

SÉRIE A, N° 423

N° D'ORDRE :

447

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

**Désiré LEROUX**

*Chef des Travaux de Chimie Agricole  
au Conservatoire National des Arts et Métiers*

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE AGRONOMIQUE  
DE DIVERS " OLIGO-ÉLÉMENTS "

Influence de Bo, F, As, I, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb

1° Sur le développement du Pois (*Pisum sativum* L.) ;

2° Sur la « qualité » de cette Légumineuse ;

3° Sur des phénomènes microbiens intéressant l'Agriculture (combustion de la matière organique, nitrification, fixation de l'azote atmosphérique).

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

devant la Commission d'examen :

MM. JAVILLIER      *Président*

COMBES

PLANTEFOL

} *Examineurs*

ALENÇON

IMPRIMERIE ALENÇONNAISE

MAISON POULET-MALASSIS

1942



# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

**Désiré LEROUX**

*Chef des Travaux de Chimie Agricole  
au Conservatoire National des Arts et Métiers*

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE AGRONOMIQUE  
DE DIVERS " OLIGO-ÉLÉMENTS "

Influence de Bo, F, As, I, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb

1° Sur le développement du Pois (*Pisum sativum* L.) ;

2° Sur la « qualité » de cette Légumineuse ;

3° Sur des phénomènes microbiens intéressant l'Agriculture (combustion de la matière organique, nitrification, fixation de l'azote atmosphérique).

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

devant la Commission d'examen :

MM. JAVILLIER / Président

COMBES  
PLANTEFOL } Examineurs

ALENÇON

IMPRIMERIE ALENÇONNAISE

MAISON POULET-MALASSIS

1942

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

*Doyens honoraires.* . . . . .

M. MOLLIARD.  
C. MAURAIN.

*Doyen* . . . . .

P. MONTEL, *Professeur*, Théorie des fonctions.

*Professeurs honoraires*

LÉON BRILLOUIN.  
AUGER.  
DANGEARD.  
LESPIEAU.  
VESSIOT.  
PORTIER.  
LAPICQUE.

G. BERTRAND.  
Ch. FABRY.  
LÉON BERTRAND.  
WINTREBERT.  
DUBOSQ.  
BOHN.  
RABAUD.

CAULLERY.  
CARTAN.  
E. BOREL.  
A. COTTON.  
J. DRACH.  
M. GUICHARD.  
LABROUSTE.



## PROFESSEURS

|                         |   |                                                           |
|-------------------------|---|-----------------------------------------------------------|
| Charles PÉREZ. . . . .  | T | Zoologie.                                                 |
| L. BLARINGHEM . . . . . | T | Botanique.                                                |
| G. JULIA. . . . .       | T | Analyse supérieure et<br>Algèbre supérieure.              |
| C. MAUGUIN. . . . .     | T | Minéralogie.                                              |
| A. DENJOY. . . . .      | T | Géométrie supérieure.                                     |
| L. LUTAUD . . . . .     | T | Géographie physique et<br>Géologie dynamique.             |
| G. BRUHAT . . . . .     | T | Physique.                                                 |
| E. DARMOIS. . . . .     | T | Enseignem. de Physique.                                   |
| A. DEBIERNE . . . . .   | T | Physique générale et Ra-<br>dioactivité.                  |
| L. DUNOYER. . . . .     | T | Chimie physique.                                          |
| M JAVILLIER. . . . .    | T | Chimie biologique.                                        |
| Henri VILLAT . . . . .  | T | Mécanique des fluides et<br>applications.                 |
| Ch. JACOB. . . . .      | T | Géologie.                                                 |
| P. PASCAL. . . . .      | T | Chimie générale.                                          |
| M. FRÉCHET. . . . .     | T | Calcul des probabilités et<br>Physique mathéma-<br>tique. |
| E. ESCLANGON. . . . .   | T | Astronomie.                                               |
| H. BÉGHIN . . . . .     | T | Mécanique physique et<br>expérimentale.                   |
| FOCH. . . . .           | T | Mécanique expérimentale<br>des fluides.                   |
| PAUTHENIER. . . . .     |   | Physique (P. C. B.).                                      |
| De BROGLIE. . . . .     | T | Théories physiques.                                       |
| CHRÉTIEN. . . . .       |   | Optique appliquée.                                        |
| PRENANT. . . . .        | T | Anatomie et Histologie<br>comparées.                      |
| VILLEY. . . . .         |   | Mécanique physique et<br>expérimentale.                   |
| COMBES. . . . .         | T | Physiologie végétale.                                     |
| GARNIER. . . . .        | T | Application de l'analyse<br>à la Géométrie.               |
| PÈRES . . . . .         | T | Mécanique rationnelle.                                    |
| HACKSPILL . . . . .     | T | Chimie minérale.                                          |
| TOUSSAINT. . . . .      |   | Technique Aéronautique.                                   |
| M. CURIE . . . . .      |   | Physique (P. C. B.).                                      |

|                                          |   |                                                           |
|------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------|
| G. RIBAUD . . . . .                      | T | Hautes températures.                                      |
| CHAZY. . . . .                           | T | Mécanique analytique.                                     |
| GAULT . . . . .                          |   | Chimie (P. C. B.).                                        |
| CROZE. . . . .                           | T | Physique théorique et<br>Physique céleste.                |
| DUPONT. . . . .                          | T | Théories chimiques.                                       |
| VALIRON. . . . .                         |   | Calcul différentiel et in-<br>tégral.                     |
| BARRABÉ. . . . .                         |   | Géologie structurale et<br>Géologie appliquée.            |
| MILLOT. . . . .                          |   | Biologie animale (P. C.<br>B.).                           |
| F. PERRIN. . . . .                       |   | Théories physiques.                                       |
| VAVON. . . . .                           | T | Chimie organique.                                         |
| G. DARMOIS. . . . .                      |   | Calcul des Probabilités et<br>Physique mathéma-<br>tique. |
| CHATTON . . . . .                        | T | Biologie maritime.                                        |
| AUBEL . . . . .                          |   | Chimie biologique.                                        |
| Jacques BOUR-<br>CART . . . . .          |   | Géographie physique et<br>Géologie dynamique.             |
| M <sup>me</sup> JOLIO-<br>CURIE. . . . . |   | Physique générale et Ra-<br>dioactivité.                  |
| PLANTEFOL . . . . .                      | T | Botanique.                                                |
| CABANNES . . . . .                       | T | Recherches physiques.                                     |
| GRASSÉ . . . . .                         | T | Zoologie (Évolution des<br>êtres organisés).              |
| PREVOST . . . . .                        |   | Chimie organique.                                         |
| BOULIGAND . . . . .                      |   | Mathématiques.                                            |
| CHAUDRON . . . . .                       |   | Chimie (P. C. B.).                                        |
| WYART . . . . .                          |   | Minéralogie.                                              |
| TEISSIER . . . . .                       |   | Zoologie.                                                 |
| MANGENOT . . . . .                       |   | Biologie végétale (P. C.<br>B.).                          |
| P. AUGER. . . . .                        |   | Physique.                                                 |
| MONNIER . . . . .                        |   | Physiologie générale.                                     |
| PIVETEAU . . . . .                       |   | Géologie.                                                 |
| ROCARD . . . . .                         |   | Physique.                                                 |
| H. CARTAN . . . . .                      |   | Calcul différentiel.                                      |
| SCHAEFFER . . . . .                      | T | Physiologie générale.                                     |
| LAFFITTE . . . . .                       |   | Chimie (P. C. B.).                                        |

*Secrétaire* . . . . . A. PACAUD.  
*Secrétaire honoraire*. . . . . D. TOMBECK.

A LA MÉMOIRE  
DE  
LUCIEN LEROUX  
(1902-1941)

MON FRÈRE  
QUI A CONSACRÉ SA VIE TROP BRÈVE  
A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

*je dédie ces pages*

D. L.



## INTRODUCTION

---

Si les végétaux empruntent à l'air et à l'eau le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et, dans certains cas, l'azote nécessaires à la formation de leurs tissus, ils prélèvent dans le sol qui les supporte des matières minérales également indispensables à leur développement.

Au <sup>xvi</sup><sup>e</sup> siècle, Bernard PALISSY montrait déjà l'importance de ces dernières dans la nutrition des plantes. Dans ses *Discours admirables* (1580), il disait : « Le sel fait végéter et croître toutes semences... [1 a]. Je ne parle pas d'un sel commun seulement, mais je parle des sels végétatifs... [1 b] » et dans sa *Recepte véritable par laquelle tous les hommes de la France pourront apprendre à multiplier et augmenter leurs thrésors*, publiée antérieurement (1563), il écrivait : « Je t'ay prouvé que, en toutes espèces d'arbres, herbes et plantes, il y avoit du sel et à présent tu veux ignorer qu'il y en aye en toutes terres. Et où penses-tu que les arbres, herbes et plantes prennent leur sel, s'ils ne le tirent de la terre... [1 c]. » Grand précurseur, le « potier de Saintes » insistait sur la nécessité de restituer au sol ces matières minérales qui lui étaient enlevées par les récoltes : « Le sel est la principale substance et vertu du fumier... Quand tu apportes le fumier au champ, c'est pour luy rebailier une partie de ce qui luy a esté osté : car il est ainsi qu'en semant le blé, on a espérance qu'un grain en apportera plusieurs : or cela ne peut estre sans prendre quelque substance de la terre, et si le champ a esté semé plusieurs années, sa substance est emportée avec les pailles et grains. Parquoy, il est besoin de rapporter les fumiers, boues et immondicitez, et mesme les excréments et ordures, tant des hommes que des bestes, si possible estoit à fin de rapporter au lieu la mesme substance qui luy aura esté ostée... [1 d]. »

Ces idées de Bernard PALISSY aussi originales que conformes à la vérité resteront cependant méconnues pendant plus de deux siècles et demi. Ce n'est qu'en 1840, en effet, que J. LIEBIG dans un ouvrage célèbre, *Chimie organique appliquée à l'agriculture et à la physiologie*, établira définitivement les bases de la théorie de la nutrition minérale des plantes. Entre temps, cependant, LAVOISIER montrait l'étroite solidarité qui unit le monde minéral aux végétaux et aussi aux animaux. Dans une note manuscrite de cet illustre savant datant vraisemblablement de 1792, mais retrouvée seulement en 1860 par J.-B. DUMAS, on lit : « Les végétaux puisent dans l'air qui les environne, dans l'eau et en général dans le règne minéral, les matériaux nécessaires à leur organisation. Les animaux se nourrissent ou de végétaux ou d'autres animaux qui ont

été eux-mêmes nourris de végétaux, en sorte que les matières qui les forment sont toujours, en dernier résultat, tirées de l'air et du règne minéral. Enfin la fermentation, la putréfaction et la combustion, rendent perpétuellement à l'air de l'atmosphère et au règne minéral, les principes que les végétaux et les animaux en ont empruntés [2]. »

En 1804, Th. DE SAUSSURE, dans ses *Recherches chimiques sur la végétation*, déclarait que les substances minérales rencontrées chez les végétaux n'étaient pas accidentelles. « Leur petite quantité n'est pas un indice de leur inutilité... Les plantes requièrent un aliment salin qui doit être modifié dans sa quantité et ses principes suivant la nature du végétal qui doit l'absorber [3]. » Effectuant de nombreuses déterminations et analyses de cendres végétales, le naturaliste genevois constatait, en effet, que la proportion et la composition de ces dernières variaient selon les espèces, l'âge et aussi selon les différents organes d'un même végétal, que cette composition était en relation avec la nature des sols sur lesquels les plantes se développaient. SAUSSURE reconnaissait, en outre, la présence dans toutes les cendres analysées, de « sels alcalins », de « phosphates terreux », de « silice », d'« oxydes métalliques ». Il reprenait, d'autre part, les études faites par J. WOODWARD [4] en 1699 sur la valeur nutritive des différents sels dans les solutions aqueuses<sup>1</sup> et constatait l'absorption des sels dissous par les plantes.

Mais c'est vraiment LIEBIG qui montra de façon péremptoire la nécessité des matières minérales pour l'alimentation des végétaux. Au début de l'ouvrage cité plus haut, il écrit : « C'est la nature inorganique exclusivement qui offre aux végétaux leurs premières sources d'alimentation... [5 a] » et un peu plus loin : « Le développement d'une plante dépend, soit de la présence d'une combinaison carbonée qui fournit le carbone, soit de la présence d'une combinaison azotée qui offre l'azote ; il dépend outre cela, de la présence de l'eau ou de ses éléments, ainsi que de la nature des principes inorganiques renfermés dans le sol et qui sont tout aussi indispensables à l'accroissement du végétal... [5 b]. » « Pour qu'un terrain soit propice à une plante, il faut qu'elle y trouve tous les principes inorganiques nécessaires à son développement, en quantité suffisante, et dans un état propre à l'assimilation... [5 c]. » « ... L'économie animale rejette à l'état d'excréments tous les principes inorganiques dont elle n'a pas besoin ; après la mort d'un individu l'azote et l'acide carbonique qui entrent dans la composition de son corps s'en retournent à l'état d'ammoniaque et d'acide carbonique par l'effet de phénomènes de fermentation et de pourriture ; il ne reste finalement, avec les os, que des matières inorganiques, comme le phosphate de chaux et quelques autres sels. Ce résidu terreux est un engrais puissant ; lorsqu'il a disparu au bout d'un

---

1. WOODWARD avait observé, fait remarquable pour l'époque, que les plantes poussent mieux dans l'eau de rivière que dans l'eau de pluie et encore mieux dans l'eau qui a enlevé à la terre ses éléments solubles.

certain nombre d'années, il faut nécessairement le renouveler, si l'on veut conserver la fertilité du sol [5 d] ».

Peu de temps après, J.-B. DUMAS et J.-B. BOUSSINGAULT, dans leur *Essai de statique chimique des êtres organisés*, adoptent les idées de LIEBIG lorsqu'ils écrivent : « Avec les matières minérales ou élémentaires, le végétal façonne des matières organisées qui s'accumulent dans les tissus [6]. »

Ces idées suscitèrent inévitablement d'ardentes controverses. Elles détruisaient, en effet, la vieille « théorie de l'humus » régnant alors en souveraine et basée sur cette hypothèse que les débris organiques du sol, après dissolution dans les eaux pluviales, étaient absorbés directement par les racines et amenés par cette voie dans les tissus des végétaux dont ils constituaient exclusivement la nourriture.

La « théorie de l'humus » était un écho de la doctrine d'ARISTOTE d'après laquelle les plantes reçoivent du sol un aliment organique tout préparé, comme les animaux le reçoivent de l'estomac. Pour LIEBIG, au contraire, la nutrition végétale était assurée par les matières minérales seules et la fertilité d'un sol dépendait de sa richesse en sels minéraux utiles et non de la quantité de matière organique qu'il renfermait.

Les objections faites aux principes posés par le chimiste de Giessen tombèrent cependant peu à peu et ces derniers ne tardèrent pas à être appliqués dans la pratique agricole. C'est qu'en effet, à la suite des controverses soulevées, des expériences de nutrition artificielle des plantes avaient été entreprises et apportaient par leurs résultats, un appui à la nouvelle doctrine.

L. WIEGMANN et L. POLSTORFF [7], dès 1842, effectuaient des essais afin de répondre à la question posée par l'Académie de Göttingue immédiatement après la publication de l'ouvrage de LIEBIG : « Les éléments inorganiques des végétaux sont-ils utiles au développement de la plante ? » Ces auteurs faisaient vivre de la vesce, de l'orge, de l'avoine, du sarrasin, du tabac et du trèfle sur un « sol » artificiel constitué par du sable et un mélange complexe renfermant différents sels et des « humates » de potasse, de soude, etc. Sur ce « sol » les plantes prenaient un grand développement et étaient beaucoup plus vigoureuses que sur du sable pur. Mais le but que WIEGMANN et POLSTORFF s'étaient assigné n'était cependant pas atteint puisque les substances utilisées dans leurs expériences n'étaient pas exclusivement minérales.

POLSTORFF [8], en 1847, entreprit une nouvelle série d'essais, cette fois, sur un « sol » simplement constitué par de la brique pilée à laquelle étaient ajoutés les éléments entrant dans la composition des cendres de la plante cultivée : l'orge. Cet auteur constata que le végétal se développait parfaitement sur ce milieu entièrement minéral.

L'emploi des « sols artificiels » n'était cependant pas nouveau. J.-B. BOUSSINGAULT, dès 1838, les avait utilisés dans ses recherches sur l'origine de l'azote des végétaux [9]. En 1855, l'illustre agro-

nome s'en servira encore [10] dans son étude de l'action du salpêtre sur le développement des plantes. Il fera végéter des *Helianthus* dans du sable pur additionné « de cendres alcalines, de cendres lavées, de nitre » et il obtiendra avec ce mélange une récolte vingt fois plus forte que celle produite avec le seul sable pur. L'utilité des matières minérales pour le développement des plantes ainsi constatée par la pesée de ces dernières sera, cette fois, définitivement démontrée.

Il restait à savoir quels étaient parmi les éléments des cendres, ceux qui s'avéraient les plus indispensables à la nutrition végétale. SALM-HORTSMAR, en 1851 [11], s'était consacré à l'étude de cette question et réussissant à cultiver de l'avoine sur du sable exclusivement additionné de sels bien définis, il reconnaissait, après des essais systématiques, la nécessité, pour le développement de cette plante, des nitrates, des phosphates, des sulfates, du potassium, du calcium, du magnésium, du fer. Un peu plus tard, en 1855, G. VILLE [12] fera également végéter des plantes dans un milieu composé de sable et de divers sels (nitrate de potassium, phosphates de calcium, de magnésium, sulfate de calcium, chlorure de sodium, oxyde de fer, silicates de potassium, de sodium) et obtiendra notamment dans ces conditions un accroissement considérable du poids des récoltes du blé.

Mais cette méthode des « sols artificiels » qui se révélait si précieuse pour l'étude des éléments utiles à la nutrition végétale, n'était cependant pas sans inconvénients. Elle faisait, en effet, usage d'un « support » qu'il était pour ainsi dire impossible de débarrasser de toutes les impuretés dont l'influence échappant à l'examen pouvait s'exercer sur le développement des plantes. Aussi, les physiologistes, cherchant des mélanges nutritifs particulièrement aptes à produire les meilleures récoltes, remplacèrent-ils bientôt ces milieux artificiels solides par des dissolutions salines très étendues. Ils reprenaient en cela la méthode dite « des cultures aqueuses » employée bien antérieurement par J. WOODWARD [4] (1699), H.-L. DUHAMEL DU MONCEAU [13] (1765), HASSENFRATZ ([14] (1792) et surtout Th. DE SAUSSURE [3 a] (1804) pour diverses expériences de physiologie végétale.

J. SACHS [15] (1858), W. KNOP [16] (1860), F. STOHMANN [17] (1862), F. NOBBE et Th. SIEGERT [18] (1862), E. WOLFF [19] (1866) entre autres, améliorèrent cette technique ancienne qui permettait à l'expérimentateur d'offrir à la plante pour son développement des substances minérales d'une nature et d'un poids bien déterminés, de suivre la marche de la végétation, de renouveler intégralement le milieu nutritif, de le faire varier à volonté, donnant ainsi la possibilité de reconnaître de façon certaine les éléments chimiques qui étaient absorbés et ceux que le végétal n'assimilait pas.

Ces différents auteurs ont pu avec des solutions salines convenables obtenir des plantes possédant des feuilles et des tiges normalement développées, des fleurs et donnant des graines capables de reproduire les espèces. Ils achevaient ainsi par cette méthode

la démonstration expérimentale de l'origine minérale des aliments des végétaux et, de plus, ils confirmaient l'utilité pour ces derniers des sept éléments suivants : azote, phosphore, potassium, soufre, calcium, magnésium et fer dont la présence avait d'ailleurs été reconnue dans les plantes par de nombreuses déterminations. Ces éléments devaient être associés, bien entendu, au carbone, à l'oxygène, à l'hydrogène, empruntés à l'air et l'eau, et sans lesquels il ne peut y avoir production de matière organisée, ainsi que l'avait montré Th. DE SAUSSURE [3 b] par des expériences qui complétaient utilement les analyses de LAVOISIER.

Les grands principes énoncés par LIEBIG, et qui se trouvaient vérifiés par les nombreux travaux qui viennent d'être évoqués, avaient été presque immédiatement appliqués à la pratique agricole, ainsi qu'il a été dit précédemment. Ils ouvraient l'ère des « engrais chimiques » dont l'influence devait être considérable sur le développement de l'Agriculture. En Angleterre, J. B. LAWES créait, dès 1842, à Deptford la première manufacture d'engrais dits « artificiels » ; en France, G. VILLE, dans ses *Conférences agricoles faites au champ d'expériences de Vincennes*, à partir de 1864, devenait l'ardent propagandiste des nouvelles idées. Cependant celles-ci, dès le début, semblaient un peu empiriques du fait qu'elles ne concernaient que quelques éléments dont l'utilité démontrée par des expériences de culture était sans doute incontestable tels l'azote, le phosphore, le potassium, mais dont il n'était pas sûr cependant qu'ils soient suffisants pour constituer l'engrais complet capable d'assurer la plus abondante récolte. Sans doute, on pouvait admettre que toute l'attention devait d'abord se concentrer sur ces éléments qui étaient à la fois ceux les plus réclamés par la plante et ceux dont les sols étaient généralement les plus dépourvus. Sans doute, on pouvait penser qu'il n'y avait pas lieu de se préoccuper des éléments supplémentaires qui, avec les premiers, constituaient l'engrais parfait, la terre les renfermant toujours en quantité suffisante. Mais il était aussi logique de se demander ce qu'il adviendrait de la végétation après plusieurs récoltes si ces éléments supplémentaires utilisés par les plantes n'étaient jamais restitués au sol.

J. RAULIN, dans ses *Etudes chimiques sur la végétation* (1870), s'est élevé contre cette conception arbitraire qui réduisait à un nombre infime les éléments préconisés comme engrais. Il déclarait notamment que la pratique agricole ne reposerait vraiment sur une base solide que le jour où serait connu le milieu artificiel complet propre à assurer le développement maximum des végétaux. « Le praticien devra abandonner l'usage ordinaire des engrais fondé sur l'empirisme. Il déterminera pour chaque plante le poids et la composition de l'engrais le mieux approprié, d'après la composition du sol et d'après la composition du milieu artificiel propre à cette plante [20]. » RAULIN estimait que le problème chimique de la nutrition végétale devait être résolu plus complètement et plus sûrement qu'il ne l'avait été jusque-là. Pour atteindre ce but, l'étude d'un végétal microscopique lui semblait préférable à celle

d'une plante supérieure en raison d'une expérimentation plus facile, de causes d'erreur moins nombreuses et aussi du fait que les végétaux inférieurs réduits à de simples cellules devaient présenter des phénomènes plus simples, plus constants et par conséquent plus faciles à saisir que ceux des grands végétaux dont l'organisation était plus complexe. S'appuyant ainsi sur la connaissance exacte des phénomènes de la végétation dans le cas le plus simple, la voie serait préparée plus sûrement pour l'étude des mêmes problèmes chez les végétaux supérieurs. RAULIN s'inspirait là des idées exprimées par son maître Pasteur, en 1862, à propos de la génération des êtres inférieurs : « Lors même qu'on craindrait de ne pouvoir appliquer aux grands végétaux les résultats fournis par ces organismes d'apparence si infime, il n'y aurait pas moins un grand intérêt à résoudre les difficultés que soulève l'étude de la vie des plantes en commençant par celles où la moindre complication d'organisation rend les conclusions plus faciles et plus sûres : la plante est réduite ici en quelque sorte à l'état cellulaire et les progrès de la science montrent de plus en plus que l'étude des actes accomplis sous l'influence de la vie végétale ou animale, dans leurs manifestations les plus compliquées, se ramène en dernière analyse à la découverte des phénomènes propres à la cellule [21]. »

Cette conception de la chimie des végétaux a poussé RAULIN à entreprendre ses fameuses recherches sur le développement d'une Mucédinée, l'*Aspergillus niger*, dans un milieu artificiel formé de composés définis. Dans ce travail l'auteur se proposait de « réaliser les conditions les plus favorables à la production du végétal ; de chercher quels étaient les éléments physiques ou chimiques qui influaient sur son développement ; de mesurer numériquement les effets de chacun d'eux ; de découvrir par l'analyse les transformations des substances qui prennent part à la nutrition du végétal ; en un mot de déterminer complètement l'équation chimique qui résume le phénomène vital » [20 a].

La méthode expérimentale particulièrement rigoureuse suivie par RAULIN devait inévitablement fournir des résultats nouveaux et importants. Elle faisait apparaître notamment la grande influence de la réaction du milieu sur le développement d'un être organisé et, d'après l'auteur, ce qui était valable pour une Mucédinée devait l'être également pour les végétaux supérieurs : « on ne peut guère se refuser à admettre l'influence de la nature acide ou alcaline du sol sur le développement de ces derniers ». Mais surtout, le travail de RAULIN mettait en évidence le rôle essentiel dans un végétal, microscopique évidemment, de certains éléments tels le magnésium, le soufre, le fer, le silicium, dont la nécessité n'était pas apparue aussi nettement dans les expériences faites par les précédents auteurs sur les grands végétaux. Il montrait l'action d'un élément nouveau, le zinc, qui se révélait indispensable au développement normal de l'*Aspergillus*, l'auteur faisant d'ailleurs observer que d'autres aussi utiles lui avaient peut-être échappé. Mais le fait peut-être le plus important qui résultait de ces recherches en ce

qui concerne l'objet du présent Mémoire était l'intervention dans la vie du végétal étudié de certains de ces éléments essentiels en proportions extrêmement petites, à tel point que RAULIN avec une prescience remarquable entrevoyait l'utilisation de cette sensibilité de l'*Aspergillus* à leur égard, comme moyen de les déceler à l'état de traces dans un milieu particulièrement complexe, tel le sol<sup>1</sup>.

Les résultats de ce grand travail sur la nutrition minérale d'un végétal inférieur, contrairement aux espérances de son auteur, ne seront guère utilisés immédiatement et même pendant un certain temps comme base d'études nouvelles sur l'alimentation des végétaux supérieurs. Les expérimentateurs qui, après RAULIN, se pencheront sur le problème de la nutrition des plantes se résoudront en effet difficilement à assimiler le développement d'une Mucédinée dépourvue de chlorophylle qui emprunte d'une façon banale l'essentiel de sa substance, c'est-à-dire son carbone, son hydrogène, son oxygène à un composé tel que le saccharose et qui ne réclame pas de calcium pour sa formation, au développement d'un grand végétal chlorophyllien prélevant les mêmes éléments, C, H, O, dans l'air et dans l'eau, par des mécanismes fort délicats et exigeant du calcium pour la constitution de ses tissus. C'est pourquoi ces chercheurs, tel HELLRIEGEL par exemple, effectuant des expériences de culture sur milieu artificiel ne modifieront guère la composition des mélanges nutritifs utilisés avant RAULIN.

Les idées de ce dernier sur la recherche d'un « engrais chimique complet » pour les végétaux, idées cependant exprimées avec une remarquable clairvoyance, seront négligées pendant plus de trente ans. Ce n'est qu'au début de ce siècle qu'elles seront reprises par G. BERTRAND. A cette époque, en effet, ce savant, après ses travaux sur le rôle du manganèse comme « catalyseur » de certaines actions diastasiques, était conduit à considérer ce métal comme essentiel à la vie de la plante, et par cela même à insister sur la nécessité de lui en fournir en cas de besoin. Entrevoyant en outre, comme RAULIN, le rôle d'autres corps simples à l'état de traces, dans le fonctionnement des végétaux et des êtres vivants en général et l'obligation qu'il y aurait un jour à restituer ces corps au sol, milieu nutritif des plantes, lorsqu'ils viendraient à manquer, G. BERTRAND orientait lui aussi, mais cette fois définitivement, la chimie biologique et la chimie agricole vers des voies nouvelles. Dans la leçon d'ouverture, en 1905, de son cours à la Faculté des Sciences de Paris, ce Maître disait : « La chimie biologique avait eu jusqu'ici comme préoccupation principale l'étude des infiniment petits orga-

---

1. En 1909, BUTKEWITSCH [22] reprendra cette idée et préconisera l'*Aspergillus* comme « réactif biologique » pour déterminer les éléments facilement assimilables des terres. En 1930, H. NIKLAS, H. POSCHENRIEDER et J. TRISCHLER [23] mettront au point une technique utilisant la moisissure pour la recherche dans ces dernières de  $P^2O_5$  et  $K_2O$  assimilables. E. G. MULDER [24] (1938) se servira de la sensibilité de l'*Aspergillus* au cuivre pour en faire la base d'une méthode de dosage de cet élément dans les sols. En 1907, M. JAVILLIER [601] étudiant l'action du zinc sur le développement de l'*Aspergillus* a mis en évidence une relation entre la quantité de métal existant dans le milieu de culture et le poids de récolte obtenu.

nisés, des microbes et des ferments ; il est possible qu'elle trouve désormais sa caractéristique dans l'étude pleine de promesses des *infiniment petits chimiques*. » Et, envisageant le programme de son enseignement, il montrait que l'étude de la composition élémentaire des êtres organisés devait comporter l'examen de deux séries d'éléments : « 1<sup>o</sup> des éléments *plastiques* qui, comme le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, etc..., constituent essentiellement les liquides et les tissus des organismes ; 2<sup>o</sup> des éléments qui n'existent dans ces derniers qu'en proportions infimes, souvent difficiles à mettre en évidence, et qui interviennent sans doute à la façon du manganèse, éléments qu'on pourrait appeler *catalytiques* [25] ».

Au VIII<sup>e</sup> Congrès international de chimie appliquée, tenu à New-York en septembre 1912, G. BERTRAND insistera plus particulièrement sur la complexité de la matière végétale, montrant de nouveau que celle-ci n'est pas constituée comme le pensaient les premiers phytophysiologistes par une quinzaine seulement de corps simples, mais d'un nombre bien plus élevé. Le perfectionnement des techniques analytiques avait permis d'en déceler une trentaine environ dont onze : C, H, O, N, S, P, Cl, Ca, Mg, K, Na (et dans certains cas particuliers Si) représentaient à très peu près 99,95 p.100 du poids de la plante, les autres tels que Fe, Al, Mn, Cu, Zn, F, I, Bo, As, etc..., n'en formant que 0,05 p. 100. « Ces métalloïdes et ces métaux, présents dans le corps de la plante en proportions infimes, peuvent cependant être des éléments physiologiques aussi nécessaires au métabolisme général que le carbone et l'azote. Trop peu abondants pour entrer dans la composition des appareils de soutien ou des substances de réserve, ils ne peuvent avoir, comme le manganèse, qu'un rôle d'intermédiaire, de catalyseur, dans les réactions chimiques. Il faut qu'ils entrent dans les cycles de transformations mis en jeu par la culture pour l'organisation des éléments plastiques et en sortent alternativement. Leur rôle est, jusqu'à un certain point, comparable à celui des ferments et on peut les appeler, autant pour faire image que par commodité, des *infiniment petits chimiques* [26]. » Dans un rapport plus récent [27] (1937), suggérant une interprétation chimique de la vie aussi bien animale que végétale, G. BERTRAND écrira : « Les éléments plastiques sont engagés dans l'organisme sous des formes très diverses, notamment de glucides, de matières grasses, de protéides, pour ne rappeler que les plus abondantes. Il est probable que si ces formes étaient seules, la vie n'existerait pas. Mais il y a, à côté des composés plastiques et passifs, les *infiniment petits chimiques*, ces éléments dont le rôle ne peut-être que celui de catalyseurs et dont on aperçoit alors toute l'importance... Envisagé du point de vue chimique, un organisme végétal ou animal apparaît comme une espèce d'oligarchie dans laquelle une foule immense composée d'atomes plastiques serait gouvernée par une minorité d'atomes catalytiques. » En 1868, J. SACHS, dans son célèbre traité de *Physiologie végétale*, exprimait une idée un peu analogue, mais de façon naturellement bien moins précise vu l'état des connaissances à cette époque : « Des différentes

substances qui entrent dans l'économie des plantes, écrivait l'illustre physiologiste de Wurzburg, les unes y jouent simplement le rôle de matières plastiques soumises à l'influence des forces de la vie végétale et des agents extérieurs ; les autres agissent elles-mêmes comme porteurs et producteurs des forces qui, dans l'intérieur de la plante, concourent avec la lumière, la chaleur, etc..., à l'accomplissement des fonctions vitales [28]. »

L'importance biochimique attribuée par G. BERTRAND aux « éléments catalytiques », dénommés encore par lui depuis 1936 « oligo-éléments [29] », impliquait l'obligation pour la plante de puiser ces derniers dans le sol où elle se développait. Sans doute, on pouvait supposer après les expériences de G. BERTRAND comme après les déductions de J. RAULIN que vu les petites quantités présumées utiles au végétal, celui-ci les trouverait facilement dans la terre, milieu résultant pour une grande part de la désagrégation de roches extrêmement variées. Cette hypothèse était vraisemblable, mais il n'en était pas moins logique, ainsi qu'il a été dit précédemment, de se préoccuper du cas où, après nombre de récoltes successives, ces « oligo-éléments » viendraient à manquer et aussi de celui, sans doute exceptionnel, où ils feraient initialement défaut. De plus, il y avait lieu de considérer, tout comme pour le phosphore ou le potassium, l'état sous lequel se trouvaient dans le sol les « oligo-éléments », ces derniers pouvant se présenter souvent sous une forme difficilement soluble et par conséquent peu assimilable par la plante. Au point de vue de la pratique agricole, il apparaissait donc nécessaire d'envisager des « engrais complémentaires » qui, en cas de besoin, complèteraient l'engrais chimique azoté, phosphaté, potassique habituellement incorporé au sol, par l'apport des « catalyseurs » : manganèse, bore ou autres, indispensables au bon fonctionnement de la cellule végétale. Dès le début de ses travaux sur les « biocatalyseurs », G. BERTRAND s'était préoccupé de cette question d'ordre agronomique et déjà en 1903, au V<sup>e</sup> Congrès international de chimie appliquée tenu à Berlin, il préconisait l'emploi en grande culture de ces « engrais complémentaires [30] » ou « catalytiques » comme il dira plus tard [31].

Dans les pages qui suivront, on mesurera l'importance que devaient prendre ultérieurement ces engrais dans quelques cas particuliers.

Cette conception de la vie végétale qui a été exposée ci-dessus et qui attribue dans cette dernière un rôle essentiel aux « oligo-éléments » a surtout son origine dans une parfaite application de la méthode dite « analytique », c'est-à-dire de celle qui demande principalement à la composition chimique des plantes les secrets de la végétation. Mais de ce que certains éléments se rencontrent toujours dans ces plantes, il n'en résulte pas nécessairement qu'ils y jouent un rôle important. Ils peuvent s'y trouver, en effet, de façon accidentelle et constituer simplement les impuretés des éléments utiles, impuretés ayant passé du sol dans les végétaux, par suite de phénomènes d'osmose. TRINCHINETTI [32], puis P. DEHÉ-

RAIN [33], ont montré naguère qu'une plante normale arrosée avec des solutions salines pouvait absorber indifféremment les divers métaux qui lui étaient offerts, même lorsqu'ils se révélaient nuisibles. L'analyse chimique d'un végétal n'apporte donc pas la preuve que les éléments qu'elle décèle jouent un rôle actif dans ce dernier, elle fournit tout au plus des présomptions. Cette analyse doit être complétée par des expériences de culture faites dans des conditions de milieu se rapprochant le plus possible des conditions naturelles, expériences purement physiologiques qui doivent mettre nettement en évidence l'action favorable de l'élément étudié. A cette technique, G. BERTRAND [27] préconise d'associer la méthode « synthétique » qui vérifie en quelque sorte l'analyse du végétal par sa synthèse et qui, obligeant celui-ci à se développer de façon complète dans un milieu artificiel constitué par des composés chimiques définis et parfaitement purs, permet de se rendre compte du degré d'utilité de ces derniers, lorsqu'ils sont supprimés un à un dudit milieu. C'est la méthode utilisée d'ailleurs, ainsi qu'on l'a vu précédemment, par les premiers chercheurs (par J. SACHS notamment) qui ont étudié la nutrition minérale des plantes.

L'analyse, l'expérimentation au laboratoire et au champ, tels sont les moyens d'investigation et de contrôle que, depuis le début de ce siècle, G. BERTRAND et ses disciples emploient ou conseillent pour montrer l'utilité des « oligo-éléments » dans la vie de la plante. Déjà le manganèse, le bore, le zinc, le cuivre même, en très petite quantité, apparaissent fondamentaux pour celle-ci et la liste n'est pas close. Sans doute, depuis longtemps, des considérations d'ordre pratique avaient conduit certains chercheurs à étudier l'action sur les végétaux et aussi sur le sol de plusieurs « infiniment petits chimiques », préconisés comme antiseptiques, fongicides, herbicides, insecticides ou susceptibles de provoquer, au voisinage de mines ou d'usines, des dégâts sur les récoltes et les résultats de ces travaux accomplis un peu « accessoirement » méritaient de retenir l'attention. Mais c'est vraiment Gabriel BERTRAND qui a montré toute l'importance biochimique et agronomique des « oligo-éléments » dont l'influence est si souvent heureuse comme on le verra plus loin.

\*  
\* \*

Si les expériences de ce Maître et de ses élèves avaient convaincu les phytophysiologistes de la nécessité des « oligo-éléments » pour le bon fonctionnement de la cellule végétale, nombre d'agronomes, envisageant surtout la production des récoltes au point de vue purement économique, restaient, il faut bien le dire, sceptiques sur l'emploi avantageux de ces « biocatalyseurs » dans les conditions ordinaires de la pratique agricole. Les résultats contradictoires obtenus dans de nombreux essais entrepris à la suite de ceux de l'auteur précité et de ses collaborateurs n'avaient pas été sans augmenter les doutes sur l'efficacité des « engrais catalytiques ». Des expériences physiologiques parfaitement conduites comme celles

de P. MAZÉ [34], par exemple, qui confirmaient de façon péremptoire les résultats favorables antérieurement acquis et qui les étendaient même, auraient dû cependant dissiper la méfiance témoignée par beaucoup de chimistes agricoles, notamment dans notre pays. Il n'en a rien été, par suite très vraisemblablement de ce fait que les expériences de cet auteur et celles d'un certain nombre d'autres, avaient été effectuées en milieu liquide, milieu idéal pour les physiologistes, mais suspect aux agronomes en raison des conditions réalisées fort différentes de celles qui s'observent dans la nature. Beaucoup de ces derniers se refusent, en effet, à assimiler une solution nutritive artificielle constituée simplement avec un certain nombre de sels introduits à des doses généralement plus élevées que celles rencontrées dans les solutions du sol, à la terre, milieu naturel complexe, variable, renfermant ou ne renfermant pas de calcaire, plus ou moins riche en colloïdes, peuplé de microbes et siège de phénomènes chimiques et biologiques importants. Sans doute, on pouvait avec une solution bien composée assurer le développement complet d'une plante jusqu'à la production de graines normalement constituées, on pouvait même obtenir de cette manière, comme en Californie où la « culture sans sol » est pratiquée sur une grande échelle, de magnifiques récoltes, mais encore une fois les conclusions fournies par une telle méthode expérimentale apparaissaient difficiles à transposer en agriculture proprement dite.

Des expériences de culture effectuées avec des milieux sableux auxquels étaient incorporés les « oligo-éléments », malgré leurs résultats souvent significatifs, ne semblent pas non plus avoir beaucoup contribué à l'emploi des « engrais catalytiques ». Le sable constitue cependant un support qui, au point de vue physique et notamment en ce qui concerne l'aération, est plus comparable au sol (les racines s'y développent mieux qu'en milieu liquide), mais il apparaît encore comme un substratum inerte, et de ce fait, très différent de la terre arable.

Restaient donc les essais effectués sur cette dernière. Il y en eut de nombreux : essais en plein champ, essais en vases, réalisés dans les conditions les plus diverses, tant par la nature des sols utilisés et des plantes cultivées, que par le choix des « oligo-éléments » expérimentés et la variété des doses ajoutées. Si beaucoup de résultats obtenus témoignent en faveur de l'utilité des « biocatalyseurs », d'autres sont nettement contradictoires en raison justement de cette trop grande diversité des conditions expérimentales. Sans doute, lorsqu'on envisage de généraliser l'emploi de certains éléments, il importe d'examiner l'action de ces derniers dans beaucoup de cas particuliers. Cette méthode n'est cependant pas sans inconvénient car la constatation inévitable de résultats négatifs risque de jeter le discrédit sur tout un ensemble de travaux reposant sur des bases scientifiques solides. Il vaut parfois mieux ne considérer qu'un seul cas en le choisissant parmi ceux qui se rencontrent le plus fréquemment et l'étudier complètement au moyen de méthodes particulièrement précises. La certitude des résultats obtenus de

cette manière permet alors des conclusions susceptibles d'apporter un appui efficace à certaines idées controversées.

C'est cette dernière conception que j'ai choisie pour réaliser le travail dont les détails seront exposés dans les pages qui vont suivre, contribution qu'il m'a semblé utile d'apporter à l'étude agronomique des « oligo-éléments ».

J'ai effectué mes expériences au moyen de techniques rigoureuses et dans des conditions comparables se rapprochant le plus possible des conditions naturelles. Ces expériences m'ont conduit non seulement à adapter et à vérifier des procédés connus choisis parmi les plus sûrs, mais aussi à imaginer des dispositifs nouveaux qui pourront sans doute être repris et utilisés pour d'autres fins.

Les métalloïdes et les métaux, dont l'action à très petites doses a retenu spécialement mon attention, sont d'abord ceux qui les mieux étudiés, tels le bore, le manganèse et aussi le zinc, ont été souvent préconisés comme engrais dits « catalytiques ». A ce titre, ils peuvent être introduits normalement dans le sol, mais avec d'autres éléments moins bien connus, ils peuvent l'être aussi accidentellement du fait de leur présence dans des engrais courants d'origine naturelle et même industrielle ou dans des produits phytopharmaceutiques. C'est pour cette raison que le fluor, l'arsenic, l'iode, le chrome, le cuivre, le plomb m'ont préoccupé également. Sans doute, d'autres « oligo-éléments » tels le molybdène, le vanadium<sup>1</sup> auraient pu figurer dans cette liste, mais pour la bonne exécution du travail projeté, j'ai dû nécessairement me limiter à ceux dont l'apport paraissait assez fréquent (hormis cependant le magnésium et le fer qui ont fait l'objet d'études importantes et que je considère d'ailleurs, en raison de leur diffusion et des quantités rencontrées, comme des éléments « communs »)<sup>2</sup>.

---

1. Ces derniers ont été examinés tout récemment d'une façon particulière par D. BERTRAND [34 bis].

2. Le Bore est présent dans le nitrate de soude du Chili (F. W. DAFERT [35], F. E. HANCE [36], R. BRECKPOT [37]). Il a été décelé dans les phosphates naturels (10 à 144 mg. par kg.), dans les superphosphates (10 à 158 mg. par kg.), dans les phosphates rocheux défluorés (20 à 30 mg. par kg.), par L. F. RADER et W. L. HILL [38]; dans des échantillons de phosphate d'ammonium (10 à 160 mg. par kg.), par R. S. YOUNG [39]. G. BERTRAND [40] a dosé dans la sylvinite d'Alsace de 1 à 6 mg. du métalloïde par kilogramme.

Le Fluor existe en quantités souvent importantes dans la plupart des phosphates naturels et des superphosphates fabriqués avec ces derniers. Les analyses effectuées par A. CARNOT, A. GAUTIER, LASNE, LIND et OBRV [41] montrent que des phosphates sédimentaires d'origine très variée contiennent de 1 à 3 p. 100 de fluor. K. D. JACOB et D. S. REYNOLDS [42] ont trouvé dans des variétés commerciales de phosphate de Floride une moyenne de 3,94 p. 100 de F et dans le phosphate de Tennessee une moyenne de 3,67 p. 100. C. BRIOUX et E. JOURIS [43] ont dosé dans des phosphates précipités d'origine minérale 1 à 1,5 p. 100 de F. Les fluorures et les fluosilicates ont été, d'autre part, préconisés comme insecticides, notamment par S. MARCOVITCH et W. W. STANLEY [44].

De l'Arsenic a été découvert dans le nitrate de soude du Chili (traces), le nitrate de soude synthétique (0,031 p. 100 de As<sup>2</sup>O<sup>3</sup>), le phosphate rocheux de Floride (traces à 0,004 p. 100 de As<sup>2</sup>O<sup>3</sup>), le nitrophoska (0,076 p. 100 de As<sup>2</sup>O<sup>3</sup>), la kaïnile (traces) par L. L. SMITH [45], dans la sylvinite d'Alsace (1/4 10<sup>-5</sup> p. 100 As) par M<sup>lle</sup> RÉMY [46], dans un phosphate d'ammonium (0,12 p. 100 As) et un superphosphate triple (0,10 p. 100 As) par R. S. YOUNG [39]. On connaît, par ailleurs, la grande consommation en agriculture et en horticulture des composés arsenicaux (arsénites de cuivre, de zinc, de

\*  
\* \*

Je me suis proposé d'examiner d'abord, car c'était mon but principal, l'influence de chacun de ces éléments : bore, fluor, arsenic,

fer, de sodium, arsénites ou arsénates de plomb, de calcium) employés en pulvérisations ou en poudrages depuis 1859 comme insecticides (lutte contre le doryphore de la pomme de terre, la chenille du cotonnier, la pyrale des pommes, la mouche des olives, la cochylys et l'altise de la vigne, les chrysomèles de l'osier, etc...) et depuis 1910 comme fongicides (notamment contre le mildiou poudré du houblon).

L'Iode est surtout présent dans le nitrate de soude du Chili. T. von FELLEBERG [47] a dosé dans un échantillon assez ancien de cet engrais 49 mg. de métalloïde par kilogramme et dans un plus récent 192 mg. par kilogramme. Le même auteur avait trouvé dans un échantillon de cyanamide seulement 0 mg. 040 d'iode par kilogramme. K. SCHARRE et J. SCHWAIBOLD [48] analysant plusieurs nitrates du Chili constatent que l'iode contenu y est principalement à l'état d'iodate avec un peu d'iodure, mais qu'il n'y existe pas sous forme de periodate.

Antérieurement F. W. DAFERT [35], examinant 8 échantillons de caliche de différentes sources, avait observé que la partie soluble contenait surtout des iodates, la partie insoluble renfermant un peu d'iodure. R. S. YOUNG [39] a trouvé dans un échantillon de nitrate de soude 0,0035 p. 100 d'iode. W. SCHREIBER [49] a décelé de l'iode dans certains échantillons de sels potassiques allemands.

De petites quantités de Chrome existent également dans le nitrate de soude du Chili (F. W. DAFERT [35], R. BRECKPOT [37]). Il est présent dans le « caliche » à l'état d'iodochromate de calcium (Dietzélite), d'après B. DIAZ OSSA [50]. Le chrome a été trouvé dans les phosphates naturels par A. GRAMMONT [51]. Cet auteur a dosé 0,028 p. 100 de métal dans un phosphate de Gafsa 63/68, 0,019 p. 100 dans un phosphate de même origine 58/63, 0,013 p. 100 dans un phosphate du Maroc, 0,011 dans un phosphate américain (Pebble) et seulement 0,00085 p. 100 dans une craie phosphatée (Baudour). Le chrome peut également se trouver dans des déchets de cuir utilisés comme engrais (R. GUILLIN [52]).

Le Manganèse est présent dans les scories de déphosphoration obtenues par les procédés basiques en raison de l'introduction de ferromanganèses dans les convertisseurs. Ch. GUFFROY, CREPEAUX et MILON [53] ont trouvé dans les scories Thomas 3,87 p. 100 d'oxyde de manganèse. A. DEMOLON et G. BROUET [54] ont dosé dans 11 échantillons de scories des quantités de manganèse total variant de 3,93 à 5,54 p. 100 ; le manganèse soluble dans l'acide citrique à 2 p. 100 oscillait entre 1,50 et 3,57 p. 100, sans qu'il y ait d'ailleurs correspondance entre la richesse totale et la portion soluble dans ce dernier réactif. J. S. Mc HARGUE [55] dans 6 scories basiques a trouvé des teneurs en Mn total comprises entre 3,3 et 6,16 p. 100 ; S. GERICKE [56] a dosé de 4,5 à 7,9 p. 100. M. POPP [57] a rencontré des teneurs plus élevées pouvant atteindre 30 p. 100 de Mn, mais il s'agissait de scories particulières, provenant de la fabrication de ferro-manganèse et de spiegel (fonte spéculaire). Le manganèse peut être également apporté au sol indirectement par des phosphates naturels (d'après R. S. YOUNG [39], le phosphate de Tennessee contient 0,147 à 0,162 p. 100 de Mn) ou par des amendements calcaires. P. E. TURNER [58] a dosé dans la chaux de Trinidad de 0,029 à 0,052 p. 100 de métal et dans la marne de même provenance de 0,04 à 0,26 p. 100.

A. GRAMMONT [51] a trouvé du Cuivre dans un certain nombre de phosphates naturels. Il a dosé, pour 100 g. de phosphate, 0 mg. 29 (Gafsa 63/68), 0 mg. 53 (Gafsa 58/63), 0 mg. 69 (Kouif), 0 mg. 90 (craie phosphatée de Vaux), 1 mg. 0 (Pebble), 1 mg. 8 (Maroc) de Cu. R. S. YOUNG [39] a rencontré ce métal dans des engrais très divers : nitrate de soude (0,003 p. 100), cyanamide (0,001 p. 100), guano (0,007 p. 100), phosphate de Tennessee (0,003 p. 100), phosphate d'ammonium (0,006 p. 100), nitrate de potassium (0,001 p. 100), sulfate de potassium (0,001 p. 100), etc. Cu a été décelé également au moyen de l'analyse spectrographique dans le nitrate de soude du Chili par R. BRECKPOT [37] et dans la sylvinite d'Alsace (10<sup>-5</sup> p. 100) par M<sup>lle</sup> RÉMY [46]. Mais le métal est surtout apporté au sol dans lequel il s'accumule en proportions souvent considérables, ainsi que l'ont montré L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY (voir plus loin, Cuivre dans le sol), par les sels de cuivre et les bouillies cupriques employées dès 1885 sur les conseils de A. MILLARDET et U. GAYON contre le « mildiou » de la vigne et ultérieurement contre beaucoup d'autres maladies des végétaux cultivés, maladies énumérées récemment par P. MARSAIS [59]. (Voir plus loin. Action du cuivre sur les plantes).

A. GRAMMONT [51] a trouvé aussi du Zinc dans les différents phosphates naturels qu'il a étudiés. Il a dosé dans 100 g. de phosphate de Pebble 5 mg. ; Gafsa 63/68, 14 mg. ; Gafsa 58/63, 27 mg. ; Kouif, 15 mg. ; Maroc, 16 mg. ; dans 100 g. de craie phosphatée (Vaux) 18 mg. de Zn. Ce métal a été aussi décelé avec le Plomb dans le

iode, chrome, manganèse, cuivre, zinc, plomb<sup>1</sup>, sur le développement d'une plante, influence se traduisant par la variation du rendement pondéral de la récolte, par rapport à des témoins.

J'ai choisi à dessein une plante de la famille des Légumineuses, le pois, pour la raison exposée un peu plus loin.

J'ai pensé ensuite qu'il y avait intérêt à observer également l'effet exercé respectivement par ces mêmes éléments sur la « qualité » de la récolte, cette qualité s'exprimant dans le cas étudié par la richesse en certains principes importants : les matières protéiques.

Enfin pour compléter ce programme, il m'a semblé utile d'examiner encore si chacun des neuf « oligo-éléments » précités avait une action sur les principaux phénomènes microbiens s'accomplissant dans le sol expérimenté : combustion de la matière organique, nitrification et aussi fixation de l'azote atmosphérique, cette dernière réalisée dans les conditions naturelles par le *Bac. radicola*, bactérie symbiotique des racines des Légumineuses (ce qui justifie le choix de la plante utilisée) et éventuellement par certains microbes du sol, les *Azotobacter* notamment. G. BERTRAND avait en effet exprimé naguère cette idée que « lorsqu'on ajoute une substance fertilisante à un sol, on n'agit pas uniquement sur la plante dont on veut augmenter la récolte, on modifie encore dans un sens ou dans l'autre la nutrition des bactéries, des champignons et de tous les êtres microscopiques qui vivent dans ce sol [25] ».

Avant d'exposer les détails de ces trois séries de recherches nécessairement liées et au risque d'« alourdir » ce Mémoire, il m'a paru indispensable, comme introduction à chacune d'elles, de présenter un résumé des principaux travaux antérieurs qui s'y rapportent. Celui-ci, vu la multiplicité des études effectuées, est fatalement incomplet. Il permettra néanmoins de « situer » les questions que j'ai envisagées et il sera peut-être aussi de quelque utilité pour ceux qui s'intéressent à des problèmes identiques ou connexes.

Mes expériences ont été entreprises au Laboratoire de chimie agricole du Conservatoire National des Arts et Métiers, où j'ai l'honneur de travailler depuis plus de vingt ans. Dans ce « haut-lieu » de science, j'ai eu le rare privilège de vivre avec le souvenir laissé, lors de leur passage, par J.-B. BOUSSINGAULT, J. J. Th. SCHLÆSING, A. MÜNTZ, P.-P. DEHÉRAIN, d'y être l'élève de A. Th. SCHLÆSING et le collaborateur de A. DEMOLON et de M. JAVILLIER. Qu'on ne s'étonne donc pas si l'on retrouve parfois dans ce Mémoire un peu de la pensée et quelques-unes des méthodes de ces Maîtres.

---

nitrate de soude du Chili (R. BRECKPOT) [37], dans un ammophos et un superphosphate fabriqué avec un phosphate naturel de Floride (F. E. HANCE) [36]. R. S. YOUNG [39] a constaté également la présence du plomb dans un phosphate d'ammonium (0,02 p. 100) et dans un superphosphate (0,006 p. 100) ; M<sup>lle</sup> RÉMY [46] a caractérisé ce métal ainsi que le zinc dans la sylvinite d'Alsace ( $10^{-2}$  Pb et  $10^{-5}$  Zn p. 100). Le plomb peut également être apporté au sol accidentellement, en même temps que l'arsenic, lors de l'utilisation de l'arséniate plombique comme insecticide.

1. Ils ont été classés pour cet examen en métalloïdes et métaux puis rangés ensuite d'après l'importance de leur poids atomique, mais cet ordre ne correspond nullement à celui qui serait établi d'après les progrès de la connaissance.

*PREMIÈRE PARTIE*

---

« OLIGO-ÉLÉMENTS »  
ET DÉVELOPPEMENT DES PLANTES

---



## PREMIÈRE PARTIE

---

# « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET DÉVELOPPEMENT DES PLANTES

---

### I

#### TRAVAUX ANTÉRIEURS

La revue des principaux travaux antérieurs aux recherches exposées dans cette Première Partie ne se limite pas strictement à ceux concernant l'influence des neuf « oligo-éléments » considérés (Bo, F, As, I, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb) sur le rendement pondéral des plantes. Elle se rapporte parfois à des expériences relatives à des changements physiologiques et à certains symptômes pathologiques se manifestant chez ces plantes du fait de l'absence ou de l'apport des dits « oligo-éléments », ces perturbations dans la vie du végétal se traduisant inévitablement par une variation de rendement.

Vu les conditions extrêmement diverses dans lesquelles ces travaux antérieurs ont été réalisés et par cela même les résultats obtenus difficilement comparables, l'exposé qui va suivre sera purement objectif et aura surtout le caractère d'un historique.

#### BORE

Depuis la découverte en 1857, par A. WITTSTEIN et F. APOIGER [60], dans les cendres des graines d'une Primulacée d'Abyssinie, d'une substance cristalline qui, aux essais, fut reconnue être de l'acide borique, nombre d'expérimentateurs (notamment E. BECHI [61] (1879), E. O. von LIPPMANN [62] (1888), C. A. CRAMPTON [63] (1889), J. S. CALLISON [64], E. HOTTER [65] (1890), N. PASSERINI [66] (1891), H. JAY [67] (1895), H. AGULHON [68] (1910), F. C. COOK [69], S. TAKAJI [70] (1916), A. S. DODD [71] (1929), G. BERTRAND avec H. L. de WAAL [72] (1936) ou L. SILBERSTEIN [73] (1937-1941)) ont dosé le bore dans des plantes extrêmement diverses, montrant ainsi que la présence de ce dernier (comme celle d'autres éléments d'ailleurs), loin d'être accidentelle, était au contraire constante et normale chez les végétaux. La grande diffusion de ce métalloïde laissait prévoir sa nécessité dans le développement des plantes. Cette nécessité pour les végétaux supérieurs se trouve aujourd'hui bien démontrée par de nombreuses expériences ainsi qu'on pourra le constater dans la revue sommaire qui va en être faite.

Pour les végétaux inférieurs, par contre, l'utilité du bore n'apparaît guère, tout au moins pour la levure (J. B. DUMAS [74], A. RABUTEAU et F. PAPILLON [75], A. PETIT [76] (1872), H. AGULHON [68] (1910)), le *Penicillium glaucum* (J. BOSEKEN et H. I. WATERMANN [77] (1912)), l'*Aspergillus niger* (H. AGULHON [68], J. BOSEKEN et H. I. WATERMANN [77]). En ce qui concerne ce dernier, il y a lieu cependant de faire remarquer que son développement a été favorisé par 0,01 p. 100 de bore (à l'état d'acide borique) dans les expériences de A. CUSAMANO [78] (1925).

Puisqu'il semble que le premier travail sur les relations du bore avec la croissance des plantes supérieures soit celui de E. HECKEL (1875), qui se rapporte à l'influence du métalloïde sur la germination, c'est l'action du bore sur ce phénomène qui sera d'abord examinée.

E. HECKEL [79] (1875) a recherché si le borate de sodium exerçait une influence sur la germination des graines de radis. Il a constaté qu'une concentration de 1,25 p. 100 de borate retardait la germination de un à trois jours et qu'une dose de 3 p. 100 l'arrêtait complètement.

J. MOREL [80] (1892) a fait tremper des grains de blé et des graines de haricot dans des solutions contenant 1, 2, 5, 10 g. d'acide borique ou de borax par litre, puis les a mis à germer soit sur du sable humide, soit en terre. Dans les deux cas, les semences trempées dans les solutions les plus concentrées (5, 10 g.) ont germé en retard et les plantes sont devenues moins vigoureuses que celles issues de semences non traitées. Le blé était d'ailleurs moins affecté par le traitement que les haricots. Quant aux solutions les plus diluées (1 et 2 p. 1.000) leur effet a été nul.

H. AGULHON [68] (1910) a expérimenté à la fois sur des grains de blé et des graines de pois mis à germer dans du sable imprégné d'une solution d'acide borique dont le titre variait de 0 mg. 5 à 5 g. par litre de liquide d'imbibition. Cet auteur n'a remarqué aucun effet favorable avec les petites doses. Avec des concentrations supérieures à 100 mg. par litre pour le blé et à 250 mg. pour le pois il a observé une action toxique.

J. A. VOELCKER [81] (1915), à la station d'expériences de Woburn (Angleterre), a effectué des essais parallèles en pots, avec l'acide borique et le borax, sur le blé et l'orge.

Ces composés du bore étaient employés aux doses de 0,0001 à 0,1 p. 100 de l'élément par rapport au contenu total de chaque pot. De l'ensemble des résultats qu'il avait obtenus, cet auteur concluait que si la proportion de bore dépassait quelque peu 0,003 p. 100 la germination était retardée ; et même avec 0,001 p. 100, surtout s'il s'agissait de borax, le phénomène paraissait également subir un certain retard.

Poursuivant son expérience, VOELCKER observait qu'avec un peu plus de 0,001 p. 100 du métalloïde sous l'une ou l'autre forme, le développement et la formation des grains étaient empêchés. A 0,005 p. 100 le bore exerçait déjà une influence toxique, mais avec des quantités ne dépassant pas 0,00025 p. 100, l'influence était légèrement favorable. Les effets dans un sens ou dans l'autre étaient d'ailleurs plus marqués avec le borax qu'avec l'acide borique.

Antérieurement à cette étude qui, on le voit, ne se limitait pas au phénomène de germination, mais qu'il était difficile dans cet exposé de décomposer, nombre d'expériences dont certaines fort importantes avaient déjà été réalisées relatives à cette question plus générale : l'influence du bore sur la croissance des plantes.

La première sur le sujet est très vraisemblablement celle faite en 1876 par E. PÉLIGOT [82]. Cet auteur, qui avait arrosé des plants de haricots âgés d'un mois avec de l'eau contenant 2 p. 1.000 d'acide borique, de borate de sodium ou de potassium, constatait qu'un seul arrosage avec une de ces solutions suffisait pour provoquer le jaunissement des feuilles d'abord et la mort des plantes ensuite.

En 1890, Ed. HOTTER [65], expérimentant sur le pois et le maïs en solution nutritive, trouvait que l'addition des doses faibles d'acide borique était inoffensive, mais que si les quantités ajoutées étaient supérieures à 10 mg. par litre, celles-ci détruisaient la chlorophylle et tuaient les racines. Le pois était d'ailleurs moins sensible au bore que le maïs.

Treize ans après, M. NAKAMURA [83] (1903) observait que 50 mg. de borax par kilogramme de sol étaient très nuisibles au développement de l'orge et que 10 mg. par kilogramme étaient encore légèrement préjudiciables. Mais une dose de 1 mg. par kilogramme exerçait une action favorable sur le pois et une de 5 mg. par kilogramme avait un effet similaire sur l'épinard.

La même année, G. BERTRAND se basant sur des considérations théoriques et les résultats de premières expériences proposait au Congrès de Chimie appliquée tenu à Berlin l'essai comme engrais non seulement du manganèse (voir plus loin) mais aussi celui de l'acide borique et de plusieurs autres substances [30]. Sous la direction de ce savant, G. RIVIÈRE et G. BAILLACHE, en 1906 [84], effectuaient des expériences de culture sur un sol argilo-sableux, auquel ils incorporaient du vanadate d'ammonium, du borate, du fluorure et de l'arséniate de sodium. Ces auteurs devaient constater une augmentation du rendement des céréales, de l'ordre de 10 p. 100. Un peu plus tard, G. BERTRAND engageait son élève H. AGULHON à entreprendre des recherches sur l'action du bore seul sur le développement des plantes. Dans sa thèse soutenue en 1910 [68] et aussi dans d'autres publications [85] AGULHON relate les expériences qu'il a effectuées à ce sujet. Celles-ci ont été réalisées de trois manières différentes : en milieu liquide stérile, sur du sable arrosé avec le même liquide nutritif, et sur de la terre soit en pots, soit en parcelles.

Sur milieu liquide dans des conditions aseptiques, les essais qui ont porté sur des doses de bore (à l'état d'acide borique) variant de 0 à 500 mg. par litre ont montré l'influence particulièrement favorable sur le blé de 2,5, 5 et surtout 10 mg. du métalloïde par litre. Au-dessus de cette concentration un effet toxique commence à se manifester et au delà de 100 mg. par litre, la vie semble impossible pour la plante. D'après AGULHON qui confirme en cela les observations de HOTTER (voir ci-dessus) l'action nocive de l'acide borique paraît se porter à la fois sur la formation de la chlorophylle et sur la croissance des racines.

Sur du sable (2 kg. par pot) arrosé avec la même solution nutritive de base (500 cm<sup>3</sup>) le développement du blé a été également favorisé avec de faibles doses de bore (0 mg. 05 et 0 mg. 5 par pot). Sur de l'avoine cultivée dans les mêmes conditions, l'action a encore été plus nette. Avec cette plante l'auteur a trouvé une augmentation en matière sèche de 59 p. 100 pour une dose de 0 mg. 05 de bore par pot et de 16,4 pour une dose de 0 mg. 5. Des cultures de radis ont été aussi très avantagées par le métalloïde (matière sèche en excédent : 39,7 p. 100 avec 0 mg. 05 de Bo par pot ; 25 p. 100 avec 0 mg. 5).

Sur de la terre dans des pots, le maïs, le radis encore, la luzerne, le pois, le cresson alénois ont été nettement favorisés par l'addition d'acide borique. 5 mg. de Bo par pot de 1.200 g. de terre ont donné notamment un excédent de matière sèche de 8,8 p. 100 pour le maïs, de 9,27 p. 100 pour le radis, de 28 p. 100 pour la luzerne, de 55,88 p. 100 pour le pois. Avec cette dernière plante, 1 mg. de Bo par pot produisait déjà une augmentation de rendement sec de 35,92 p. 100 ; avec le cresson alénois, la même quantité de Bo donnait une augmentation de 4,5 p. 100. La dose mortelle pour le pois était située entre 50 et 100 mg. de Bo par pot. Cultivée dans les mêmes conditions, la vesce cyanhydrique par contre n'a pas fourni une quantité de matière sèche supérieure en présence de bore.

Les expériences en pleine terre faites avec des doses de 0 g. 5 et 1 g. de métalloïde par mètre carré ont porté sur le pois, l'avoine, le maïs, le colza, le navet. Si aucune augmentation de la récolte n'a été constatée avec le pois et l'avoine, vraisemblablement en raison de la quantité trop élevée pour ces plantes de l'élément fourni, quantité qui s'est montrée indifférente mais non nuisible, un notable excédent du rendement sec a été trouvé avec les autres espèces cultivées : 50 p. 100 avec le maïs, 21 p. 100 avec le colza, 32 p. 100 avec le navet, pour la dose de 0 g. 5 de Bo par mètre carré. Cet important travail d'AGULHON devait attirer tout particulièrement l'attention des chercheurs sur le rôle agronomique du bore.

Depuis 1910, les expériences de culture avec ce métalloïde ont été en effet fort nombreuses.

E. HASELHOFF [86] (1913) effectue en 1913 des expériences en solutions avec le maïs et le haricot et en terre avec cette dernière plante et l'avoine. Il trouve qu'en solution la concentration maximum ayant une influence utile est probablement de 1 mg. de bore par litre. Sous forme de borax, cette quantité a en effet avantaagé la récolte des haricots, tout en exerçant une action défavorable sur l'aspect des plantes. Des doses plus fortes sont manifestement préjudiciables ; celle de 1 mg. 13 dans un litre de solution nutritive a été nettement toxique pour le maïs. Dans les cultures en terre, le bore à des doses ne dépassant pas 1 mg. pour 8 kg. de sol (soit 0,00001 p. 100) a produit un heureux effet.

W. E. BRENCHLEY [87] (1914) étudie l'action du bore sur la croissance du blé en milieu liquide et trouve que si l'acide borique est nuisible à des doses supérieures à 10 p. p. million, il semble avoir un effet utile à des dilutions plus faibles (0,5 p. p. million). Il favoriserait notamment la formation de fortes racines et de pousses vigoureuses. D'après cet auteur, certains champignons seraient indifférents à de fortes concentrations en bore. BRENCHLEY qui s'est particulièrement attaché à l'étude de ce métalloïde observera plus tard [88] (1926) que les Légumineuses tout spécialement réclament des traces de bore (1 p. p. 2.500.000). En l'absence de celui-ci, il se produirait des changements anatomiques dans les plantes, notamment une désagréation et un noircissement des tissus. Avec K. WARRINGTON, W. E. BRENCHLEY [89] (1927) confirmera cette nécessité pour cette famille de plantes ainsi que pour le melon et certaines céréales.

A l'occasion d'une étude sur les effets du borax et de la colémanite (borate de Ca) calcinée comme larvicides contre les mouches communes, étude entreprise par les Bureaux d'Entomologie, de Chimie et d'Industrie végétale des Etats-Unis, F. C. COOK [90] (1916) a effectué des essais en pots et en plein champ dans le but de déterminer notamment l'influence du fumier de cheval additionné de bore sur la croissance des plantes. Expérimentant avec diverses espèces, il a obtenu entre autres les résultats suivants : dans les essais en pots, la production des tomates n'était aucunement affectée quand le borax était ajouté à la terre en quantités correspondant à 0,0018 p. 100 de bore. Mais, quand la dose de ce dernier atteignait 0,003 p. 100 la production diminuait. En plein champ, la récolte en blé d'une parcelle recevant une forte quantité du métalloïde (50 tonnes de fumier boriqué (avec 0,5 p. 100 de borax) par hectare) a été inférieure de 10 p. 100 à celle d'une parcelle qui avait reçu la même quantité de fumier sans bore. Mais la récolte de la parcelle traitée au fumier boriqué a toujours été supérieure à celle d'une parcelle qui n'avait pas reçu de fumier. Dans une autre série d'expériences sur cette plante, expériences entreprises avec J. B. WILSON [91] (1917) et prolongées pendant trois années, COOK voulut s'assurer si le bore apporté chaque année au sol par le fumier boriqué ne s'accumulait pas à la longue dans la terre, et n'avait de ce fait, par la suite, une action nuisible plus intense. Il appliqua la première année une dose de borax (suffisante pour détruire les larves) correspondant à 173 kg. d'acide borique à l'hectare, et les deux années suivantes une quantité correspondant à 42 kg. du même composé à l'hectare. Les deux premières années, les auteurs observèrent une diminution de 10 p. 100 de la récolte par rapport à la parcelle traitée au fumier seul. La dernière année, le rendement de la parcelle ayant reçu du fumier traité au borax fut relativement plus élevé.

COOK et WILSON constatèrent la présence de composés solubles du bore dans le terrain, neuf mois après la première application de borax, mais non après les autres. Il ne semblait donc pas qu'une action cumulative du bore se manifestât. Celui-ci se convertissait très vraisemblablement en composés insolubles n'exerçant aucune action toxique sur le blé.

Dans d'autres expériences qui durèrent également trois ans et qui furent entreprises sur différentes cultures dans plusieurs régions des Etats-Unis, F. C. COOK et J. B. WILSON [91 bis] (1918) observèrent que les Légumineuses étaient particulièrement sensibles au bore. Ils remarquèrent

d'autre part que dans un terrain recevant soit 0,0044 p. 100 d'acide borique sous forme de borax soluble, soit 0,0058 p. 100 du même composé sous forme de colémanite insoluble, les laitues, les épinards et les choux n'éprouvèrent aucun dommage ; par contre dans un autre terrain situé à 8 km. du premier, les mêmes quantités de bore firent diminuer le rendement des mêmes plantes. Des différences analogues furent constatées avec d'autres espèces développées dans divers terrains. Dans beaucoup de ces derniers, les plantes tendaient par ailleurs à absorber le bore proportionnellement à la quantité incorporée au sol, tandis que dans d'autres, il n'y avait pas de relation entre la quantité de bore ajoutée et celle qui était absorbée. Ainsi donc action toxique et absorption variaient suivant la nature des sols et des plantes.

Cette étude du bore dans la nutrition végétale serait incomplète si n'était évoquée la défaveur dont cet élément fut l'objet aux Etats-Unis pendant plusieurs années, de 1916 à 1924. Durant cette période, les livraisons d'engrais potassiques provenant de sources allemandes étant arrêtées, les fermiers américains employèrent du chlorure de potassium extrait des eaux salées du lac Scarles, en Californie. Des dommages furent observés sur les récoltes. S. D. CONNER d'abord seul [92] (1917), puis avec E. N. FERGUS [93] (1920), en rechercha, à la station expérimentale de l'Indiana, l'origine. Celle-ci fut trouvée être la présence notable de borax (jusqu'à 6,25 p. 100) dans le produit utilisé. CONNER, après avoir effectué des expériences en pots avec le maïs, arriva à cette conclusion que l'apport au sol de 112 kg. par hectare d'un engrais contenant 2 p. 100 de borax anhydre était déjà nuisible.

Les expériences effectuées avec FERGUS, au champ, en sols neutres ou acides, sur le maïs également, montrèrent que les dégâts les plus graves étaient constatés non seulement avec les doses les plus élevées de borax, mais aussi lorsque les graines se trouvaient dans le sol au voisinage de solutions salines fortement concentrées par suite du manque de pluie ou surtout de l'emploi d'un semoir distribuant simultanément la semence et l'engrais. C'est ainsi que 0 kg. 560 à 4 kg. de borax anhydre par hectare produisirent un effet toxique sur le maïs quand ce sel était incorporé avec la graine dans les sillons alors que 16 à 18 kg. de borax par hectare appliqués sur toute la surface du sol ne causèrent aucun dommage.

A propos de cette présence accidentelle du bore dans les engrais, de nombreuses expériences, en pots et en plein champ furent entreprises aux Etats-Unis sous la direction du Département de l'Agriculture en coopération avec les fermiers des Etats du Maine, de New-York, de New-Jersey, de Virginie, de la Caroline du Nord et du Sud, de Géorgie. Elles ont porté quelquefois sur le blé, mais surtout sur la pomme de terre dans les Etats du Nord et sur le cotonnier dans les Etats du Sud. Les résultats de ces essais qui ont été évoqués en France dans une publication de A. BRUNO [94] (1920) ont fait l'objet aux Etats-Unis d'une circulaire officielle due à O. SCHREINER, B. E. BROWN et J. J. SKINNER pour les recherches sur le sol et à M. SHAPOVALOV pour la pathologie végétale [95] (1920) dont voici la conclusion : la limite de toxicité grave est pour le blé d'environ 2 kg. 300 à 3 kg. de borax par hectare ; pour le coton 9 à 10 kg. par hectare. Pour les pommes de terre, 20 kg. de borax par hectare produisirent une véritable dévastation comme aussi des doses moindres dans les cas de sécheresse. Sur le même sujet il y a lieu de citer les essais particuliers de A. W. BLAIR [96] (1920), de A. W. BLAIR et B. E. BROWN [97] (1921), de B. E. BROWN, seul [98] (1922) à la Station expérimentale de New-Jersey, de W. J. MORSE [99] (1920), à celle du Maine qui ont montré plus spécialement les effets dépressifs sur la pomme de terre de quantités souvent très petites de borax, ceux de J. R. NELLER et W. J. MORSE [100] (1921) ou de J. R. NELLER seul [101] (1922) qui ont porté à la fois sur la pomme de terre, le maïs et les haricots et qui ont montré que les Légumineuses étaient particulièrement sensibles au bore, fait déjà remarqué par COOK et WILSON. La dose de borax anhydre appliquée dans les sillons et susceptible d'être supportée par ces plantes ne devait pas dépasser 3 kg. par hectare alors que pour le maïs elle pouvait être fixée un peu au-dessous de 5 kg., et pour les pommes de terre un peu au-dessus de ce dernier chiffre. NELLER a trouvé également que

de la chaux ajoutée au sol rendait le borax moins toxique pour les plantes. J. E. BRECKENRIDGE [102] (1921), expérimentant un peu antérieurement sur les mêmes plantes, avait fixé comme limite extrême 6 kg. de borax à l'hectare, pour le maïs et les haricots. Une dose de 8 à 10 kg. diminuait la proportion des tubercules de pomme de terre et augmentait celle des racines superficielles ; par contre, un excédent de rendement était constaté lorsqu'on appliquait 4 à 6 kg. de borax à l'hectare.

Les expériences de J. J. SKINNER, B. E. BROWN et F. R. REID [103] (1923) qui ont été effectuées également sur le maïs, les haricots, la pomme de terre ont confirmé la tolérance plus grande de cette dernière plante pour le bore et aussi l'importance au point de vue de la toxicité du mode de répartition dans le sol de ce métalloïde.

J. J. SKINNER et F. E. ALLISON [104] (1923) ont plus spécialement étudié à la ferme d'Arlington, en Virginie, et au « Muscle Shoals » dans l'Alabama, l'influence du borax contenu dans les engrais sur le développement du cotonnier. Dans les engrais répandus à la volée sur le sol silico-argileux d'Arlington, 5 kg. de borax par hectare n'ont pas eu d'effet nocif, 10 kg. ont été légèrement toxiques et 20 kg. ont réduit le poids des plantes vertes de 15 à 35 p. 100. Quand les engrais ont été distribués dans les sillons, la dose de 5 kg. est apparue déjà nuisible. Des résultats similaires ont été obtenus dans le sol argileux du « Muscle Shoals ». Dans une des expériences, 5 kg. de borax à l'hectare appliqué en ligne avec l'engrais ont diminué le poids frais des plantes de 5,7 p. 100 ; avec 10 kg. la diminution a été de 12 p. 100 et avec 20 kg. de 39 p. 100.

Ces expériences des auteurs américains assez concordantes causent un certain étonnement du fait que des résultats favorables avaient été obtenus, notamment en France (H. AGULHON), avec des doses de bore plus élevées que celles considérées comme toxiques par les chercheurs précités. A. BRUNO (loc. cit.) donne une explication vraisemblable de cette divergence en montrant son origine dans l'usage américain d'incorporer dans les sillons la semence et l'engrais en une seule et même opération, méthode susceptible de créer une concentration élevée en bore au voisinage des graines, fait d'ailleurs constaté dans les expériences relatées ci-dessus, alors qu'en France la pratique courante consiste à répandre les engrais en surface suffisamment longtemps avant l'ensemencement.

Il y a lieu également de faire remarquer qu'une importance exagérée a sans doute été attribuée dans les travaux ci-dessus aux résultats obtenus avec de fortes concentrations de borax.

Si les appréhensions américaines ont pu retarder de plusieurs années l'application du bore à la pratique agricole, elles n'ont guère influencé les expériences de laboratoire concernant cet élément qui ont été encore entreprises dans divers pays.

C'est ainsi que P. MAZÉ [105] (1915), dans son étude d'une solution minérale capable d'assurer l'évolution complète du maïs cultivé à l'abri des microbes, trouve que le bore est indispensable au développement de cette plante au même titre que l'azote, le phosphore, le potassium, etc. J. VAN OVERBEEK [106] (1934), dans des expériences effectuées quinze ans plus tard, fera une constatation analogue.

K. WARINGTON [107] (1923) observe qu'en culture dans l'eau l'acide borique aux concentrations de 1/12.500.000 à 1/25.000 est utile au développement de la fève. A celle de 1/2.500.000 il donne au végétal une structure anatomique normale [108] (1926) tandis qu'en son absence les boutons floraux tombent, la structure de la tige et des racines se modifie ; il se forme une hypertrophie des cellules cambiales suivie de leur désagrégation. Le phloème et le xylème sont atteints.

Cette plante dont l'extrême sensibilité au bore a été confirmée par A. B. FAGUNDES [109] (1926) pourrait d'après J. DUFRENOY [110] (1937) constituer un indicateur précieux de la déficience des sols en ce métalloïde.

La modification des cellules des racines du fait de l'absence de bore dans le milieu remarquée sur *Vicia faba* par K. WARINGTON et aussi par W. E. BRENCHLEY et H. G. THORNTON [111] (1925) a été observée également

sur *Pisum sativum* par A. L. SOMMER et H. SOROKIN [112] (1928). On saisira dans la suite toute l'importance de cette modification chez une plante telle que la betterave à sucre, par exemple.

L'absolue nécessité du bore pour les Légumineuses a été confirmée encore par M. P. LÖHNIS [113] (1937) dans des expériences sur la luzerne, le haricot, huit variétés de pois ; A. NOWOTNOWNA avec des cultures de lupin jaune [114] (1935) et de soja [114 a] (le métalloïde étant ajouté à la dose de 3-12 mg. seulement de  $H^3Bo^3$  par pot de 9 kg. 5 de sable). En ce qui concerne cette dernière plante, G. H. COLLINGS [115] (1927) n'avait pu antérieurement observer un effet favorable du bore. Mais des expériences récentes de S. V. EATON [116] (1940) sans montrer l'inutilité du bore pour le soja ont fait voir tout comme celles de A. NOWOTNOWNA que la plante ne tolérât que de petites applications du métalloïde. Dans un essai sur la lentille, en terre de limon recevant des doses d'acide borique correspondant à 3 kg. 2, 6 kg. 4, 12 kg. 8, par hectare, H. BURGEVIN [117] (1936) n'a pas constaté d'action utile. K. SCHARER et W. SCHROPP [118] (1936) dans des cultures de pois, de haricot et de soja, en solutions nutritives, ont comparé l'action du bore et de la silice selon que ces corps sont employés seuls ou en mélanges. Sur le pois, le bore utilisé seul se montre toxique à la dose de 2 mg. 5 par litre alors que cette même dose se montre utile en présence de 10 g. de silice colloïdale. Sur le haricot, Bo à la dose de 0 mg. 5 par litre a exercé une action très favorable avec augmentation du taux chlorophylle p. 100 de matière sèche. Mais le soja contrairement aux observations relatives ci-dessus a particulièrement bénéficié d'un apport du métalloïde (50 p. 100 d'excédent de récolte). D'après les essais de ces auteurs, il apparaît que des mélanges de Bo et de  $SiO^2$  en proportions convenables agissent plus favorablement que Bo employé seul.

H. R. Mc LARTY, J. C. WILCOX et C. G. WOODBRIDGE [119] (1937) ont observé en Colombie britannique un jaunissement de la luzerne dû au manque de bore. Les tiges et les feuilles des plantes jaunes étaient toujours moins riches en bore que celles des plantes vertes. Des applications de très petites quantités de cet élément ont remédié à ce jaunissement.

A. L. SOMMER et C. B. LIPMAN [120] (1926) ont montré l'utilité du bore aussi bien pour les fèves que pour le sarrasin, le lin, la moutarde, le ricin, le coton, l'orge.

En ce qui concerne les céréales, il ne semble pas cependant que l'action du bore soit aussi marquée sur ces plantes que sur d'autres espèces végétales. J. S. Mc HARGUE et O. M. SHEDD [121] (1930) expérimentant sur l'avoine en milieu sableux ont constaté notamment que si le bore augmentait la récolte de la paille, il diminuait celle du grain comparativement avec les résultats obtenus avec un sel de manganèse. H. S. MORRIS [122] (1931) a trouvé que les borates alcalins à une concentration correspondant à 0 g. 003-0g. 0005 de Bo par litre favorisaient le développement du blé, mais que par contre l'acide borique ne produisait aucun effet. R. S. YOUNG [39] (1935), dans son important travail sur les oligo-éléments, n'a pas observé une influence très nette du bore sur l'avoine, celle-ci, il est vrai, dans les expériences de cet auteur, avait été récoltée avant maturité. H. BURGEVIN [123] (1936), G. JORET et H. MALTERRE [124] (1936) avec le blé n'ont pas trouvé d'excédent de rendement en grain et en paille, du fait d'un apport d'acide borique à des sols de limon. Mais il y a lieu de faire remarquer que cet apport était relativement élevé (20 kg. à l'hectare dans les expériences de BURGEVIN ; 11 kg. de borax dans celles de JORET et MALTERRE). Ces derniers auteurs signalent cependant que le bore a notablement favorisé la levée, augmenté le nombre de pieds au mètre carré, mais les plantes ont été moins robustes et l'indice de tallage un peu inférieur. J. GAROLA [125] (1937), appliquant 15 kg. de borate de sodium à l'hectare, n'a trouvé aucune action de celui-ci sur le rendement en grain du blé et la petite augmentation constatée dans la production de la paille a été de l'ordre des erreurs d'expérience. V. VINCENT [126] (1937), expérimentant sur l'avoine, n'observe non plus aucune différence significative, du fait d'un apport de 5 kg. ou 10 kg. de  $B^2O^3$  (en borate de sodium) à l'hectare. M. P. LÖHNIS [113] (1937)

a constaté que les céréales se développaient parfaitement bien dans un milieu dépourvu de bore. Comme G. BERTRAND et H. L. de WAAL [72] (1936) cet auteur a d'ailleurs trouvé que les Graminées étaient particulièrement pauvres en ce métalloïde alors que les Légumineuses apparaissaient plutôt riches [127] (1936). Dans des expériences récentes, W. SCHROPP et B. ARENZ [128] (1940) constatent cependant qu'en cultures dans l'eau, l'orge et le millet réclament du bore. Si pour l'orge celui-ci vient à manquer ou est seulement présent à une dose de 0 mg. 01 Bo par litre la formation du grain et même l'épiage ne s'effectuent pas. Il faut au moins 0 mg. 1 pour que le développement soit normal. Pour le millet également, le manque de bore empêche la formation des graines. M. TOKUOKA et M. HITOSHI [129] (1937) ont montré d'autre part que l'addition à des sols de 0,02 à 2,0 p. de Bo p. million augmentait la récolte du riz.

Comme SOMMER et LIPMAN, M. V. KATALYMOV [130] (1935) a montré l'heureuse action du bore sur la culture du lin, particulièrement dans les sols sablonneux acides. D'après cet auteur, ainsi que d'après A. D. KOSTYNCHENKO [131] (1938) et E. TRUNINGER [132] (1938) Bo corrige dans les sols schaulés, notamment dans les années sèches, l'action nuisible de la chaux sur la plante. E. V. BOBKO et V. V. ZERLING [133] (1938) ont aussi montré l'influence favorable de Bo sur la récolte du lin, notamment en ce qui concerne la production des graines, les expériences étant effectuées sur un sol semi-marécageux à réaction alcaline. Ch. BRIOUX et E. JOUIS [134] (1938) n'ont pu par contre, en terre légère sablo-limoneuse, mettre en évidence cet effet utile.

M. Y. SHKOLNIK [135] (1935) a trouvé que le bore était indispensable au développement du chanvre et F. M. EATON [136] (1932), K. T. HOLLEY et I. G. DULIN [137] (1937), M. TOKUOKA et D. SUISEN [138] (1937) ont montré son utilité pour celui des plantes de coton.

J. P. MARTIN [139] (1934) a étudié plus spécialement les effets du métalloïde sur la canne à sucre, cultivée dans un milieu aqueux à pH 5,2, acidité fournissant, d'après des expériences préliminaires, un rendement optimum. Une dose de 0,22 de Bo p. m. était suffisante pour assurer une croissance normale, mais en son absence cet auteur observait un retard dans la végétation de la plante, des feuilles déformées, chlorotiques, présentant des lésions caractéristiques, enfin un dépérissement général. Ces symptômes étant très similaires à ceux du « pokkah böeng », maladie de la canne à sucre, MARTIN en conclut que celle-ci est due à une déficience en bore.

Si en Californie des dommages ont été observés par W. P. KELLEY et S. M. BROWN [140] (1928), C. S. SCOFIELD et L. V. WILCOX [141] (1931) sur les *Citrus* à la suite du passage dans les eaux d'irrigation de petites quantités du borax utilisé comme fongicide (une dose de 1 mg. par litre se montrait nuisible), il n'en est pas moins vrai cependant que le bore en très petites quantités est d'après A. R. C. HAAS [142] (1929-1930) nécessaire à la croissance des agrumes. Selon cet auteur et L. J. KLOTZ [143] (1931) le meilleur développement est atteint lorsque la solution nutritive contient 0,2 millionième de bore. Si ce dernier est absent ou à une concentration moindre, il se produit des troubles physiologiques très graves : les feuilles prennent une couleur brunâtre ou vert-jaune, s'enroulent autour de la nervure médiane qui se fendille et devient comme du liège, puis elles tombent. Lorsque le malaise de l'arbre est très grand, on remarque la formation de multiples bourgeons à bois, provenant de jeunes ramilles qui meurent alors qu'elles sont à peine visibles. Avec la désagrégation du cambium et du phloème (libre) il se produit une grosse quantité de gomme qui s'échappe à l'extérieur par les fentes de l'écorce. Un apport de bore fait disparaître toutes ces lésions.

Le développement de bien d'autres plantes peut être favorisé par un apport de ce métalloïde au milieu nutritif.

W. MAIER [144] (1937), C. F. RUDLOFF, W. HERBST et E. SCHNEIDERS [145] (1937) ont montré son utilité pour la vigne ; D. A. VAN SCHREVEN [146] (1935), G. JORET et H. MALTERRE [147], V. VINCENT [148] (1936) pour la pomme de terre. J. S. Mc HARGUE et R. K. CALFEE [149] (1932-

1933) ont observé que sur des laitues développées en milieu sableux dépourvu de bore, des taches noires apparaissaient et qu'en peu de jours les plantes qui étaient comme brûlées périssaient. De petites quantités d'acide borique, des borosilicates sous forme de poudre de verre Pyrex ajoutés au milieu empêchaient l'altération. Mais si à des concentrations de 0,4 à 0,9 p. p. m. le bore assurait un développement normal et même vigoureux de la plante, une dose de Bo de 1,2 p. p. m. était déjà toxique ; elle produisait la chlorose et la mort des plus vieilles feuilles. Une quantité de 2,5 p. p. m. était fatale. Cette nécessité du bore pour la laitue devait être confirmée par R. J. MUCKENHIRN [150] (1936). E. R. PURVIS et R. W. RUPRECHT [151] (1935-1936) ont montré par des expériences en serre et en pleine champ qu'une application de 11 kg. 200 (dose maximum) de borax par hectare arrêtaient le développement d'une maladie du céleri, sévissant en Floride et connue sous le nom de « craquelure des tiges. » Cette application améliorait en même temps le rendement et la qualité de la plante.

Le bore est particulièrement nécessaire à la tomate. E. S. JOHNSTON avec W. H. DORE [152] (1928-1929) ou avec P. L. FISHER [153] (1930), D. A. VAN SCHREVEN [154] (1935) estiment que 0,5 p. d'acide borique p. million sont indispensables au développement normal de la plante. Si Bo vient à manquer, des symptômes analogues à ceux constatés par BRECHLEY et WARINGTON sur d'autres plantes se manifestent : arrêt de la croissance des racines et des tiges, chlorose avec enroulement des feuilles et épaississement de leur tissu, désagrégation progressive du cambium, du phloème et du parenchyme, etc. W. E. LOOMIS et J. J. WILSON [155] (1933), R. B. FRENCH [156] (1936) ont confirmé ce besoin absolu de bore pour la tomate.

T. R. SWANBACK [157] (1927), J. E. Mc MURTREY Jr. [158] (1929) ont montré que le métalloïde à une dose de 0,4-0,5 p. 1.000.000 était essentiel à la croissance du tabac en solution nutritive. Ce dernier auteur observait notamment que si le bore était absent, il se produisait sur la plante (à la partie terminale du bourgeon) des lésions caractéristiques. L'année suivante en 1930, J. KUIJPER [159] (1930) à Sumatra décrivait cette maladie du tabac connue sous le nom de « Top Zeikte » (maladie du bourgeon) et faisait ressortir que l'insuffisance de bore était un facteur à considérer pour la culture de la plante en pleine terre. Expérimentant, cette fois, au champ Mc MURTREY [160] (1935) observait que l'utilisation d'engrais chimiques relativement purs comme fumure du tabac, sur un sol sableux et pendant une période de cinq ans, avait provoqué l'apparition chez la plante des symptômes caractéristiques d'une carence en bore. Ces derniers se révélaient par la couleur vert clair des jeunes feuilles formant le bourgeon, par la contraction et l'enroulement de celles-ci et enfin par la mort du bourgeon. Une application, la dernière année, d'une dose de 5 kg. 5 d'acide borique à l'hectare sur quelques parcelles avait empêché la manifestation de ces symptômes. Les effets de la déficience en bore sur le tabac ont été également constatés par A. I. SMIRNOV [161], M. MES [162] (1930), D. A. VAN SCHREVEN [163] (1934). Selon M. F. MORGAN et O. E. STREET [164] (1938) les sols destinés à la culture de cette plante doivent renfermer au moins 1 kg. de Bo par hectare. F. TERLIKOWSKI et K. MILKOWSKI [165] (1934) ont reconnu aussi l'absolue nécessité du métalloïde pour la croissance normale des deux plantes précitées : tomate et tabac. Mais c'est surtout sur les plantes-racines que le manque de bore dans le milieu nutritif se fait particulièrement ressentir.

En 1931, E. BRANDENBURG [166] (1931) cultivant des betteraves fourragères dans la solution nutritive de CRONE qui ne comporte pas de bore constatait chez les plantes tous les symptômes de la maladie dite « pourriture du cœur » et il en concluait que cette dernière avait pour origine l'absence du métalloïde dans le milieu. Continuant ses recherches, en expérimentant cette fois sur la betterave à sucre [167] (1932) qu'il cultivait sur du sable seul et sur du sable contenant 4 p. 100 de tourbe, il obtenait une augmentation du poids des racines, feuilles et sucre par l'emploi d'acide borique à la dose de 1 à 30 mg. par pied. Des symptômes d'insuffisance de bore étant observés

sur des plantes cultivées dans un milieu faiblement acide pH 5,5, dans la même proportion que dans un milieu pour ainsi dire neutre pH 6,8, il apparaissait que la réaction du milieu n'était pas un facteur principal. Des expériences furent faites en pleine terre au cours desquelles 6 kg. 150, 13 kg. 500 et 20 kg. de borax furent épanchés respectivement sur des terrains d'environ 1 ha.  $\frac{1}{2}$  alors que deux bandes de la longueur du champ et dont la surface était d'environ 1 ha. n'étaient pas traitées afin de servir de témoins. Dans ces dernières les betteraves cultivées furent très atteintes par la maladie du cœur, tandis que dans les parcelles traitées une belle récolte fut obtenue.

Cette « pourriture du cœur de la betterave » avait été observée depuis bien longtemps en France. En 1864 PLUCHET la décrivait en ces termes à la Société royale et centrale d'Agriculture : « Au mois d'août les feuilles perdent leur fraîcheur et leur éclat qui est remplacé par une teinte plus terne ; bientôt les pousses les plus tendres qui occupent le centre du collet noircissent complètement ; en même temps, des taches jaunes et brunes couvrent les feuilles les premières malades, elles s'étendent en stries allongées sur la membrane charnue..., les feuilles se fanent et meurent. On aperçoit sur la racine des plantes attaquées des taches livides qui envahissent quelquefois la moitié de sa surface. La chair que ces taches recouvrent se décompose à son tour et l'on pourrait croire que la pourriture complète de la racine est imminente, car les progrès du mal vont s'aggravant de jour en jour pendant un mois environ. Lorsque cessent les grandes chaleurs, lorsque les nuits à la fin du mois d'août deviennent plus longues et les matinées plus fraîches, les plaies des premières racines attaquées sèchent peu à peu. L'on aperçoit autour du collet de la plante le germe de petites feuilles qui annoncent une nouvelle végétation et la cicatrisation des plaies de la racine s'opère presque complètement. Cependant, dans un certain nombre de cas, les atteintes ont été si profondes que, malgré les circonstances les plus favorables la plante périt quel que soit son degré de force et de vigueur au moment où la maladie se déclare... » [168].

La « pourriture du cœur » coïncide avec des périodes de sécheresse, des chaulages considérables et aussi l'apparition sur les feuilles d'un champignon décrit tout particulièrement par E. PRILLIEUX et G. DELACROIX [169] (1891) sous le nom de *Sphaerella tabifica* et par A. B. FRANK [170] (1892), sous le nom de *Phoma betæ*, qui le considéraient comme la cause de la maladie. G. BERTRAND dans l'étude qu'il a faite de cette dernière [171] (1939) a montré les deux tendances qui s'étaient manifestées en ce qui concerne son origine : celle attribuant au champignon parasite le rôle d'agent primaire, celle recherchant la source du mal dans les conditions physiques ou chimiques du milieu dans lequel la plante se développe (sécheresse, structure du sol le rendant incapable de retenir l'humidité, alcalinité excessive de ce dernier).

Il est vraisemblable que toutes ces causes supposées se juxtaposent, mais il semble bien aussi, après les expériences de BRANDENBURG et après celles particulièrement nombreuses qui les ont confirmées, que la déficience en bore du milieu doit jouer un rôle important sinon primordial dans l'apparition et l'évolution de la maladie. Les multiples expériences au laboratoire et en pleine terre dans les conditions de la pratique agricole entreprises depuis 1931 dans divers pays ont en effet montré de façon irréfutable que le bore agissait comme préventif et curatif de la « maladie du cœur de la betterave ». Leur analyse dépasserait singulièrement les limites de cette étude, aussi seulement quelques-unes des plus importantes seront ici mentionnées par ordre chronologique.

Parmi ces dernières, on peut citer celles de E. V. BOBKOV et M. A. BELVOUSSOV [172] (1933), K. MEYER-HERMANN [173] (1933 à 1936), O. KAUFMANN [174], K. de HAAN [175], E. FOEX et H. BURGEVIN [176], A. NOWOTNOWNA [177], N. I. SOLIMSKAYA [178], R. FISCHER [179], R. SCHMID [180] (1934 et ann. suiv.), C. BRIOUX et E. JOUIS [181], E. KRAUS [182], K. SCHUMANN [183], K. SCHARER [184], E. VARGA [185], J. E. KOTILA et G. H. COONS [186] (1935), G. JORET et H. MALTERRE [147], J. GAROLA [187], E. A. JAMALAINEN [188], L. DECOUX, J. VANDERWAEREN et G. RO-

LAND [189], E. NEUWEILER [190], F. HANLEY et J. C. MANN [191], D. A. VAN SCHREVEN [192] (1936 et ann. suiv.), E. W. SCHMIDT [193], H. OSVALD et P. GUNNAR [194], H. HIRSH [195], W. E. BRENCHELEY et D. J. WATSON [196], W. SCHROPP et K. SCHARRER [197] (1937), H. D. BROWN [198], J. PAZLER [199], O. FALLADA [200], G. BARATHON MAZEN [201] (1938), R. L. COOK [202] (1940).

Il semble, d'après FOEX et BURGEVIN qui ont particulièrement étudié la question, que les meilleures doses de bore à utiliser pour combattre la maladie correspondent pour un premier traitement à 8-10 kg. d'acide borique ou à 13-16 kg. de borate de sodium par hectare, la dose la plus élevée n'étant employée que pour les sols où d'ordinaire la maladie sévit avec le plus d'intensité. Ces quantités étant mélangées très intimement avec les engrais ordinaires épandus avant le semis ne sont pas susceptibles d'exercer une influence toxique par suite de l'accumulation de Bo dans le sol. Il y a lieu de faire remarquer en effet que l'action du bore ne se limite pas à la première année d'application mais que si celui-ci n'est pas entraîné dans les eaux de drainage une arrière-action peut se manifester pendant un certain temps, de sorte que lorsque la betterave revient en culture une addition de 3 à 5 kg. d'acide borique ou de la quantité équivalente de borax est suffisante pour maintenir les nouvelles plantes en bon état. H. BURGEVIN [203] (1938-1939) a montré tout particulièrement la relation entre l'influence des borates et la pluviosité provoquant leur entraînement facile par les eaux de drainage (fait confirmé par E. R. PURVIS et W. J. HANNA [204] (1938)). A Versailles, en terre de limon, BURGEVIN a constaté qu'en période sèche 30 kg. de borate de soude ont exercé une action dépressive sur le sarrasin (la sécheresse maintenant Bo dans la zone explorée par les racines) tandis qu'une dose de 100 kg. appliquée en mars au cours d'une période humide n'a produit aucun effet toxique sur le blé de printemps, l'avoine et la féverole, Bo ayant été vraisemblablement entraîné dans les couches profondes.

Les résultats obtenus par l'emploi du bore dans la lutte contre la « maladie du cœur de la betterave » incitèrent les agronomes à rechercher les causes et à découvrir le remède d'une maladie très analogue favorisée également par le chaulage et sévissant sur les navets et les rutabagas (« maladie du cœur brun » ou « Raan »). Ainsi qu'il fallait s'y attendre, cette dernière résultait aussi d'une insuffisance de bore dans le milieu nutritif, élément particulièrement utile au bon développement de ces plantes d'après D. G. O'BRIEN et R. W. DENNIS [205], H. HILL et E. P. GRANT [206] (1935), R. R. HURST et D. J. MAC LEOD [207] (1936), T. RIGG, H. O. ASKEW et E. CHITTENDEN [208], M. B. DAVIS et W. FERGUSON [209] (1937). Des applications au sol d'acide borique à la dose d'environ 6 kg. 5 à 8 kg. ou de borax à celle de 10-12 kg. par hectare suffisent pour enrayer la maladie (S. S. MAC LEOD et J. L. HOWATT [210] (1934), E. A. JAMALAINEN [211], T. WHITEHEAD [212], F. B. CHANDLER, J. A. CHUCKA et I. C. MASON [213] (1935), D. G. O'BRIEN et R. W. DENNIS [205], G. B. SNYDER et R. W. DONALDSON [214], J. W. WOODCOCK [215] (1936), E. CHITTENDEN et L. COPP [216] (1937)).

Le bore est aussi essentiel au développement du chou-fleur et sa déficience provoque le brunissement des inflorescences constituant la tête et la diminution de ces dernières, symptômes disparaissant par l'incorporation au sol de petites quantités de borax de l'ordre de celles indiquées ci-dessus (C. H. DEARBORN, H. C. THOMPSON et G. J. RALEIGH [217] (1936), F. B. CHANDLER, J. A. CHUCKA et I. C. MASON [218] (1937), W. FERGUSON [219] (1938)). Enfin des expériences réalisées notamment de 1935 à 1938, en Nouvelle-Zélande, aux Etats-Unis, au Canada, ont montré que la maladie du « liège des pommes » caractérisée par de petites taches brunes de liège dans la chair du fruit pouvait être combattue avec succès par des pulvérisations sur le feuillage, après la nouaison des fruits, à l'aide de solutions de borate de sodium à 0,25 et 0,50 p. 100, ou avec des applications de ce sel au sol, à la dose de 50 à 100 kg. par hectare ou de 225 à 450 g. par arbre suivant leur développement (J. D. ATKINSON [220], H. O. ASKEW et E. CHITTENDEN [221], J. S. BAILEY et W. H. THIES [222], H. HILL et M. B.

DAVIS [223], H. R. Mc LARTY, J. C. WILCOX et C. G. WOODBRIDGE [224], W. M. CARNE et D. MARTIN [225], C. G. SAVAGE et H. BROADFOOT [226], L. C. YOUNG et C. F. BAILEY [227] (1936-1937), A. B. BURREL [228], J. R. MAGNESS [229] (1938)). C. BRIOUX et E. JOUIS [230] (1937) ont, en France, vérifié cette action du bore. Dans un verger normand légèrement atteint par la maladie, ces auteurs ont appliqué au sol 200 g. de borate de soude par arbre de la variété « Reinette du Mans ». Si pour les témoins non traités il y avait relativement peu de pommes atteintes du liège, pour les arbres ayant reçu du borate, la proportion des pommes saines fut sensiblement plus élevée. Pour H. HILL [231] (1935), l'origine de la maladie doit être cherchée dans la teneur élevée des sols en chaux, le haut pourcentage d'azote et de matière organique de ces derniers, mais il semble plutôt d'après H. O. ASKEW [232], T. RIGG [233] (1935), C. G. WOODBRIDGE [234] (1937), E. S. DEGMAN, L. P. BATJER, L. O. REGEIMBAL et J. R. MAGNESS [235] (1938) qu'il faille l'attribuer à une déficience en bore assimilable des sols des vergers.

Dans le même ordre d'idées, il pourrait être remédié, d'après A. A. MORRIS [236] (1938) au « Hard Fruit » des orangers, par des applications de 25 à 1.000 g. de borax par arbre, les symptômes de cette maladie étant en relation d'après l'auteur, avec un manque de bore.

Si les expériences qui viennent d'être évoquées montrent l'utilité incontestable du bore pour le développement normal des plantes, on est encore bien mal renseigné sur son rôle dans la vie du végétal, c'est-à-dire s'il intervient comme régulateur dans l'assimilation d'autres éléments ou bien s'il prend directement part à des processus physiologiques. D'après E. V. BOBKO, T. V. MATVEEVA et G. S. SYVOROTKIN [237] (1935), le fait que le bore introduit dans une solution nutritive augmente beaucoup la récolte en graines des plantes cultivées, donne à penser que l'élément joue un certain rôle dans la fécondation de la fleur. Cette hypothèse trouve également sa justification dans cet autre fait : les auteurs analysant les différentes parties de la fleur du pommier ont trouvé que le bore s'accumulait surtout dans les pistils. E. V. BOBKO et V. V. ZERLING [133] (1938) ont fait la même constatation chez d'autres plantes, notamment le tabac, la colchique, la courge, le maïs : le bore y existe aussi en quantité importante dans les stigmates et les styles du pistil des fleurs. D'autre part, ces mêmes auteurs ont confirmé une observation de TH. SCHMUCKER [238] (1934), à savoir que le bore exerçait une action particulièrement favorable sur la germination des grains de pollen. Il y a lieu de rappeler ici que dans les expériences de K. SCHARER et W. SCHROPP [118] relatées précédemment, le métalloïde a augmenté le taux de chlorophylle d'une plante cultivée. On verra en outre plus loin que le bore favorise la production de certains principes immédiats utiles.

## FLUOR

Dès 1903, S. SUZUKI et K. Aso [239] étudient l'action du fluorure de sodium sur un certain nombre de plantes et constatent que ce composé exerce une heureuse action sur l'avoine et le radis.

Un peu plus tard, K. Aso seul [240] (1906) observe un effet favorable de petites quantités du même sel sur de nombreuses plantes de jardin, cultivées en pots. Les fleurs apparaissent plus tôt dans les lots traités. Mais cet auteur constatant dans d'autres expériences [240 a] (1906) la toxicité du fluorure de sodium pour les graines et les jeunes plantules pense que dans le sol ce sel passe promptement à l'état de fluorure de calcium peu soluble et que c'est ce dernier composé qui agit favorablement. Aso trouve d'ailleurs une confirmation de cette manière de voir dans des essais sur le pois et l'orge.

S. UCHIYANA [241] (1907) observe aussi un heureux effet du fluorure de

sodium, variant d'ailleurs avec les plantes. Il considère comme dose utile 100 à 1.000 g. de ce sel par hectare.

S. KAKEHI et K. BABA [242] (1907) comparant l'action sur le blé du sulfate de manganèse et du fluorure de sodium obtiennent de meilleurs résultats avec le premier de ces composés.

P. MAZÉ [34, 105] (1914-15) estime que le fluor est nécessaire au développement du maïs.

Mais c'est à A. GAUTIER et à P. CLAUSMANN que l'on doit l'étude la plus importante de l'action du fluor sur le développement des plantes. Ces auteurs, après avoir montré l'existence du métalloïde dans les tissus végétaux [243] (1916), ont conclu à son rôle nécessaire dans l'économie de la plante. Celle-ci devant obligatoirement emprunter son fluor aux fluorures et aux fluophosphates du sol où elle croît, A. GAUTIER et P. CLAUSMANN [243 a] (1919) ont recherché les conditions qui favorisent cette assimilation et observé l'état du végétal lorsqu'il recevait ou était privé de fluorures.

A cet effet, ils ont effectué une série d'essais culturaux en vases sur un milieu artificiel constitué par du charbon de bois de bouleau lavé à l'acide et à l'eau bouillante; additionné d'un peu de terre arable et des éléments fertilisants indispensables. Des plantes furent cultivées : 1° sur le milieu charbonneux seul qui renfermait 11 mg. de fluor par kg. ; 2° sur le même milieu additionné de 850 mg. de fluor par kg. sous forme de fluorure de potassium ; 3° sur de la terre de jardin ordinaire. Ces essais ont montré que sur les treize espèces cultivées qui appartenaient à des familles très diverses, sept ont été favorisées par le fluor (cresson, chou, *Escholtzia*, épinard, vipérine, spergule, chanvre), trois sont restées indifférentes (belle-de-jour, oignon, seigle) et trois (pois de senteur, pois chiche, centaurée) ont donné des récoltes inférieures à celles des témoins.

A. GAUTIER et P. CLAUSMANN, après ces essais préliminaires, ont effectué des cultures en pleine terre [243 b] (1919). Au sol argilo-siliceux, à peine calcaire, du champ d'expérience, et contenant initialement 88 mg. de fluor par kilo, les auteurs ont ajouté sur les parcelles à fluorer 55 g. 8 de fluorure de calcium amorphe par mètre carré sur une épaisseur de 0 m. 25, ce qui correspondait à 100 mg. de fluor par kg. de terre. (Aux parcelles non fluorées était incorporée une petite quantité de craie pulvérisée correspondant à la chaux apportée par le fluorure de calcium.) A. GAUTIER et P. CLAUSMANN qui ont cultivé dans ces conditions de nombreuses plantes ont obtenu entre autres les résultats suivants : blé : accroissement de récolte totale 13 p. 100, augmentation des grains 18 p. 100 ; avoine : accroissement de récolte 12 p. 100, augmentation des grains 5,2 p. 100 ; carottes : gain des parcelles fluorées 17,9 p. 100 ; pommes de terre : légère supériorité la première année, puis gain de 58,7 p. 100 la deuxième année ; betteraves, déficit dans les parcelles fluorées ; pois, légère supériorité des parcelles fluorées : 5,7 p. 100 en plus la première année et 12,6 p. 100 la deuxième ; haricots, égalité ; choux, égalité la première année et apparemment pas d'influence favorable exercée par le fluor ; pavot, gain de 14 p. 100 dans la parcelle fluorée. Les auteurs font d'ailleurs remarquer que le fluorure de calcium cristallisé ou les fluophosphates naturels qui ont été aussi essayés, n'ont pas la même efficacité que le fluorure de calcium en poudre amorphe.

A. WÖBER [244] (1920) rapporte que  $\text{CaF}_2$  n'est pas nuisible à la végétation tandis qu'au contraire  $\text{NaF}$  à la concentration de 0 g. 01 par litre produit un léger effet défavorable.

J. A. VOELCKER [245] (1921), effectuant des expériences en pots avec du blé, constate qu'une addition au sol de fluorure de potassium correspondant à 0,1 p. 100 de fluor a quadruplé la récolte, alors que le fluorure de sodium ajouté en quantité équivalente a détruit absolument toutes les plantes. L'addition de ce dernier sel a d'ailleurs modifié entièrement la structure du sol qui, sablonneux, a pris une apparence argileuse.

Le fluorure de sodium lorsqu'il a été ajouté en plus petites quantités a exercé une action favorable après destruction d'un certain nombre de

plantes et modification de l'aspect du sol, celle-ci étant moins profonde qu'avec la dose forte.

L'auteur a expérimenté sans profit le fluorure de calcium, mais il a obtenu une notable augmentation de récolte avec le fluosilicate de calcium.

O. LÆW [246] (1925) a observé une action favorable du fluorure de sodium quand ce dernier était appliqué à la dose de 0 kg. 300 par hectare, mais sur certains sols le maximum d'effet n'était constaté qu'avec une dose de 1 kg. par hectare. Plus le sol contenait de chaux, plus facilement le fluorure de sodium se transformait en fluorure de calcium peu soluble qui seulement pouvait produire le faible effet favorable.

A. H. MEYER [247] (1931) cultivant du sarrasin sur du sable quartzueux ne trouve pas d'augmentation de récolte par l'addition de fluor à la solution nutritive.

C. P. SIDERIS et B. H. KRAUSS [248] (1931) observent une action favorable du fluor sur *Ananas sativus* et *Zea mays* lorsque la concentration du milieu en cet élément est élevée.

K. SCHARRER et W. SCHROPP [249] (1932) étudiant l'influence du fluor sur la germination et le début du développement de quelques plantes de grande culture ont constaté que jusqu'à 300 mg. de F par vase de NEUBAUER, l'influence toxique de cet élément sur l'avoine, le seigle, le blé et l'orge était très faible, un peu plus forte cependant en sol acide qu'en sol neutre.

L. B. WILSON [250] (1933) a examiné les effets du fluor sur le tabac. D'après cet auteur, NaF ajouté en excès transforme l'eau libre de la plante en eau fixée et, la quantité de cette dernière étant notable, il provoque de ce fait un état de sécheresse physiologique.

R. S. YOUNG [39] (1935) constate que 100 p. p. m. de fluor, incorporés à un sol acide, ont favorisé le développement de la fléole.

J. GRINTZESCO et S. PETERFI [251] (1936) étudiant l'action du fluor sur la croissance de *Microthamnion kutzingianum* (Naeg.) trouvent que le maximum de concentration supporté par cette algue est de l'ordre de 0,001 p. 100.

D. I. ARNON [252] (1938), cultivant des asperges et de la laitue dans une solution nutritive dépourvue d'oligo-éléments, n'obtient aucune amélioration de la récolte par l'addition au milieu de 0,005 p. p. m. de fluor.

On a vu précédemment que le fluor pouvait être incorporé au sol incidemment, du fait de sa présence fréquente dans les engrais phosphatés naturels et aussi en raison de l'emploi de divers composés fluorés en phytopharmacie. Certains auteurs se sont préoccupés de l'action exercée sur les plantes et d'autres de celle exercée indirectement sur les animaux par cet apport généralement inévitable de fluor au sol.

C'est ainsi que C. BRIOUX et E. JOURS [253] (1934) ont effectué des cultures en vases sur terre sableuse (en 1932) et sur terre de limon additionnée d'un peu de terre sableuse (en 1933) dans le but de déterminer si le fluorure de calcium existant à faible dose dans les phosphates précipités minéraux (à l'état libre et non sous forme de fluophosphate) exerce une action favorable sur la végétation et à partir de quelle dose cette action peut devenir nuisible. Chaque vase contenant environ 7 kg. de terre avait reçu une bonne fumure complète de base (0 g. 5 de N et de  $P_2O_5$ , 0 g. 75 de  $K_2O$ , plus quelques grammes de craie broyée).  $P_2O_5$  était apporté sous forme de phosphate bicalcique pur auquel on ajoutait du fluorure de calcium pur à doses croissantes correspondant en F à 1,25 p. 100; 2,5, 5 et 10 p. 100 du poids du phosphate, soit à environ 10, 25, 50 et 100 kg. de fluorure de calcium par hectare. Les essais étaient effectués en double sur le maïs. En 1932 et 1933, les auteurs ont trouvé une augmentation de récolte (de 4,7 p. 100 en moyenne) pour la dose la plus faible de fluorure (10 kg. par hectare). Les essais de 1932 sur terre sableuse pauvre se sont différenciés de ceux de 1933 en ce sens que le fluorure se montra encore nettement favorable pour la dose de 25 kg. par hectare. L'action dépressive moyenne a crû avec l'augmentation de la dose de fluorure.

En résumé, dans ces expériences, le fluor, à faible dose, s'est montré utile à la végétation ; son action nocive s'est manifestée lorsque les quantités ajoutées dépassaient celles apportées habituellement par les phosphates précipités minéraux et qui sont généralement inférieures à 1,0 ou 1,5 p. 100.

P. H. PHILLIPS, E. B. HART et G. BOHSTEDT [254] (1933-1935) se sont demandé si ce fluor contenu dans les phosphates naturels ne constituait pas un danger pour la santé publique. D'après ces auteurs, l'application de 1.000 kg. de phosphate naturel apporte approximativement au sol 35 kg. de fluor (environ la moitié de cette quantité quand l'engrais phosphaté employé est le superphosphate). Les plus fortes quantités de F trouvées dans les récoltes obtenues sur les sols ayant reçu ces engrais phosphatés étaient de l'ordre de 2 mg. par kg. dans le foin de Marshfield<sup>1</sup>. Or la vache pouvant absorber 1.000 mg. de F par jour, sans inconvénient, l'usage des engrais phosphatés n'avait pas lieu de préoccuper les hygiénistes.

H. H. MORSE [255] (1935) a examiné l'influence du fluor contenu dans les engrais phosphatés sur la germination du maïs. Les expériences effectuées au laboratoire, en serre et au champ ont montré que les superphosphates étudiés étaient capables d'exercer une action nuisible sur la dite germination du fait de leur teneur en fluorures solubles. Cette toxicité était amoindrie quand on laissait s'effectuer les réactions entre le sol et l'engrais.

R. P. BARTHOLOMEW [256] (1935) a effectué également des essais dans le but de déterminer l'action possible sur les récoltes du fluor apporté au sol non seulement par les superphosphates, mais aussi par les insecticides. Des essais de germination réalisés par cet auteur, avec des graines de Légumineuses et de Graminées, n'ont révélé aucune action toxique du fluor à l'état de fluorure de calcium, de sodium ou de fluosilicate de sodium, même à la concentration de 50 p. p. m. dans la solution d'humidification. L'addition de fluorure soluble jusqu'à 10 p. p. m. à une solution nutritive n'a pas diminué sensiblement la quantité de matière sèche d'une récolte de doliques obtenue sur cette solution. Le fluor était localisé dans les racines de la plante et c'était seulement quand la quantité de cet élément était élevée dans les racines qu'on en trouvait dans les parties aériennes du végétal. A une augmentation du taux de fluor dans les racines correspondait une diminution du phosphore dans les parties aériennes. L'addition au sol de composés fluorés solubles ne paraissait pas avoir modifié l'assimilabilité du phosphore du sol et du phosphate monocalcique apporté, mais en ce qui concernait le phosphore des phosphates naturels et des scories, celui-ci était d'autant moins assimilable que la teneur en fluor de ces engrais était plus élevée.

S. MARCOVITCH [257] (1928), ayant étudié la toxicité des composés du fluor sur les organismes et notamment celle des fluosilicates utilisés pour la protection des plantes contre les insectes phytophages, estime que ces composés sont des poisons protoplasmiques dont l'action serait due à une précipitation de Ca sous forme de  $\text{CaF}^2$ . Les dommages causés à la végétation par les fluosilicates employés semblent imputables à l'humidité libre et c'est  $\text{Ca}(\text{OH})^2$  utilisé comme support de  $\text{Na}^2\text{SiF}^6$  qui paraît être la cause, en présence d'humidité, de l'action néfaste. Les fluorures de Ca, Mg et Sr ont été moins toxiques.

S. M. MASHTAKOV et K. I. STRACHITSKII [258] (1935) ont eux aussi examiné les dommages causés aux plantes par les fluorures et les fluosilicates. Ils ont trouvé (les expériences de laboratoire s'accordant avec celles effectuées au champ) que la toxicité des seconds était plus élevée que celle des premiers, sauf pour les fluosilicates de K et de Na qui sont moins toxiques. Les auteurs ont classé la toxicité de ces composés dans l'ordre décroissant suivant : fluorures de K, Na, Al, Mn, Mg, Ca, Ba ; fluosilicates de Ca, Mg, Mn, Na, Al, K, Ba.

---

1. A. GAUTIER et P. CLAUSMANN ont trouvé dans un foin formé principalement de graminées mûres 0 mg. 4 pour 100 g. de substance fraîche.

## ARSENIC

L'étude de l'influence de l'arsenic sur le développement des plantes a depuis longtemps attiré les chercheurs, en raison surtout de l'emploi souvent préconisé de ce métalloïde comme fongicide, herbicide et insecticide, parfois aussi du fait de sa présence en petites quantités dans certains engrais usuels ainsi qu'on l'a vu précédemment ou encore dans les fumées des usines métallurgiques. L'arsenic a été également examiné en tant que « catalyseur » éventuel de la végétation.

Une distinction a presque tout de suite été faite entre les arsénites très toxiques (F. NOBBE, P. BAESSLER et H. WILL [259] (1884)), et les arséniates supportés plus facilement par les végétaux supérieurs et inférieurs (KNOP [260] (1885), LÆW [261] (1893), MOLISCH [262]).

Dès 1875, E. HECKEL [263] a constaté que l'acide arsénieux et les arsénites solubles, à une dose relativement faible (0 g. 25 pour 90 g. d'eau), arrêtaient la germination et tuaient l'embryon des graines de radis.

Plus tard, A. S. KITCHCOCK et M. A. CARLETON [264] (1893) étudiant l'effet de divers fongicides sur la germination des graines de maïs trouvent que celle-ci est arrêtée notamment par l'arséniate de sodium à 2,5 p. 100 après un contact de vingt-quatre heures, par le même sel en solution à 5 p. 100 après seize heures, à 10 p. 100 après cinq à huit heures, à 20 p. 100 après le même temps de contact (cinq à huit heures). Quant à l'arsénite de sodium, en solution à 0,5 p. 100, il retarde de cinq à huit heures la germination de 80 p. 100 des graines.

B. JONSON [265] (1896) a examiné aussi l'influence de l'arsenic sur la germination des graines, réalisée comparativement sous des cloches en verre et dans des enveloppes en papier. Dans ces dernières, exposées à l'air libre l'auteur a trouvé un plus grand nombre de graines germées et il a expliqué ce résultat par l'action antiseptique de As sur des micro-organismes provenant de l'extérieur. Par contre, dans les expériences effectuées sous cloche, il a observé un effet toxique de As, se traduisant notamment par une diminution de 15 p. 100 dans le nombre de graines de fléole germées.

J. FAUGERAS et SCHIFF [266] (1928), expérimentant l'arsénite de sodium pour la destruction de l'épine-vinette et d'autres plantes adventices, observent qu'après arrosage d'un sol avec une solution du sel, des graines semées dans ce sol contenant alors 0,04 p. 100 d'arsenic lèvent bien, mais le développement ultérieur des plantules se trouve très gravement affecté. Le seigle résiste au traitement, par contre les Légumineuses y sont très sensibles.

J. VALLEGA et R. FRESA [267] (1933) appliquant l'arséniate de soude comme herbicide à des concentrations variant de 1 à 1,5 p. 100 ont constaté que ce sel n'avait sur le système souterrain des plantes qu'une action très limitée, qu'il n'exerçait aucun effet nuisible sur le sol et que même il pouvait agir favorablement sur le développement du végétal.

Les composés arsenicaux étant depuis longtemps utilisés aux Etats-Unis contre le charançon du cotonnier (1872) et la pyrale des pommes (1888) leur étude a retenu longtemps les chercheurs de ce pays. Parmi les travaux les plus récents, il y a lieu de citer ceux de R. Y. BAILEY et J. M. ROBINSON [268] (1934) qui ont comparé pendant dix années la récolte en coton produite sur des parcelles ayant reçu divers engrais ( $\text{NaNO}_3$ , superphosphate et KCl) et celle obtenue sur des parcelles identiques, mais recevant en plus de l'arséniate de calcium pulvérisé. Les auteurs ont constaté que ce composé avait augmenté de façon notable le rendement en coton et qu'il n'y avait pas d'incompatibilité entre cet apport de As et les engrais introduits.

REED, J. FIELDING et M. B. STURGIS [269] (1936) employant les composés arsenicaux en pulvérisation sur le coton également ont observé qu'un effet nuisible était produit par ces derniers, notamment par les arsénites, sur les récoltes suivantes de riz, dans certains sols irrigués du « Southwest ». Ils ne trouvaient cependant aucune relation entre la teneur du sol en arsenic soluble dans l'eau et la toxicité de cet élément.

C. DORMAN et R. COLEMAN [270] (1939), expérimentant sur les cinq types de sols à coton les plus courants, n'ont obtenu aucune modification de rendement sur quatre de ces sols à la suite d'un apport d'arséniate de calcium à des doses atteignant jusqu'à 1.760 kg. à l'hectare. De faibles doses ont produit un excédent de récolte sur le cinquième sol. Les auteurs attribuent cette augmentation à trois causes : action sur la nutrition des plantes, libération de  $P_2O_5$  du sol et stimulation de l'activité bactérienne dans ce dernier. Dans les sols n'ayant pas réagi aux apports d'arséniate, il y a eu insolubilisation de l'arsenic par suite du pH élevé et de la forte teneur en colloïdes. C. DORMAN et R. COLEMAN estiment que les traitements arsenicaux du coton ne risquent pas de provoquer une baisse du rendement, les doses d'arséniate utilisées étant trop faibles pour produire dans les sols une accumulation préjudiciable aux récoltes.

S. C. VANDECAVEYE, G. M. HORNER et C. M. KEATON [271] (1936) rapportent par contre que l'accumulation de composés arsenicaux solubles, par suite du traitement antérieur de pommiers transplantés ailleurs, est la cause principale de la non-productivité de certains sols de la vallée de Yakima (Etat de Washington). Ils ont trouvé dans des échantillons prélevés à la surface 4,5 à 12,5 p. p. m. d'As (calculé en  $As_2O_3$ ) facilement soluble. Cette teneur est en relation d'après les auteurs, avec la médiocre végétation de l'orge sur ces sols. Des dosages effectués sur la plante en pleine maturité ont donné de 10,01 à 17,5 d' $As_2O_3$  p. p. m. dans les parties aériennes et de 788 à 1.640 p. p. m. dans les racines. Les auteurs ont réalisé des essais en pots montrant qu'on pouvait obtenir dans des sols sains les mêmes phénomènes de toxicité avec l'addition de 5 p. p. m. de  $As_2O_3$  ou plus.

M. RAUCOURT [272] (1938) avait trouvé, immédiatement à la suite de traitements arsenicaux de pommiers sur pré-verger réalisés dans le courant de 1935, des quantités d'arsenic retenues par l'herbe du pré de l'ordre de 40 à 50 mg. par mètre carré de sol et de 50 à 80 mg. par kilogramme d'herbe.

L'arsenic a été aussi préconisé comme agent de stérilisation partielle du sol, c'est-à-dire comme destructeur des protozoaires existant dans ce milieu, protozoaires ennemis des bactéries utiles. A cet égard et accessoirement sur l'influence qu'il est susceptible d'exercer indirectement sur les récoltes, il a donné lieu à des expériences importantes, notamment de la part de G. RIVIÈRE et G. PICHARD. Ces auteurs ont fait connaître en 1922 [273] les résultats des recherches qu'ils ont poursuivies pendant plusieurs années à la Station agronomique de Seine-et-Oise, sur la stérilisation partielle du sol au moyen de divers sels et notamment de l'arséniate de soude et sur l'action de ce dernier sur les rendements de quelques plantes de grande culture par suite des modifications biologiques produites dans la faune du sol. Aux doses employées (voir ci-après) ce sel a parfaitement rempli son rôle de stérilisateur partiel et de plus il s'est comporté indirectement comme un fertilisant. Des doses de 21 kg. et 42 kg. à l'hectare ont notamment élevé le rendement en grain du blé Chiddam de printemps (de 440 kg. avec la première dose, de 577 kg. avec la seconde) et de l'avoine blanche de Ligowo (de 1.253 kg. avec 21 kg. de sel, de 1.393 kg. avec 42 kg.). Des apports de 20 et 30 kg. d'arséniate de soude à l'hectare ont augmenté respectivement le rendement en tubercules de la pomme de terre de Saint-Malo de 2.000 et de 2.540 kg. Mais une dose de 100 kg. de ce sel à l'hectare a exercé une action plutôt dépressive sur la richesse en grain d'un blé d'hiver.

C. PICADO [274] (1922), lui, ne constate pas une action apparente de l'arsenic comme agent de stérilisation, lorsqu'il est appliqué à petites doses. Mais un apport de 1 kg. seulement à l'hectare augmente la récolte du maïs fourrage. Cette augmentation disparaît lorsque les quantités incorporées au sol dépassent 8 kg. par hectare.

Des expériences ont été effectuées il y a bien longtemps déjà, sur l'apport accidentel d'arsenic par certains engrais, notamment par les superphosphates. Les résultats sont évidemment en rapport avec les quantités rencontrées. C'est ainsi que E. LYTTKENS [275] (1894), conclut des essais qu'il a effectués avec plusieurs de ces superphosphates contenant de l'arsenic que

cet élément ainsi introduit dans le sol est un poison pour les plantes. A. STUTZER [276] (1901) estime que le pourcentage d'arsenic dans les superphosphates (0,011 à 0,02, quelquefois 0,05 p. 100) est trop faible pour rendre vénéneuses les plantes développées sur des sols recevant ces engrais, notamment l'orge employée à la fabrication de la bière.

H. ROSENBAUM [277] (1940) observe que les particules solides des fumées s'accumulent dans le sol au voisinage des usines métallurgiques causent des dommages aux cultures, du fait de la présence d'arsenic dans ces particules, dommages peu visibles en plein champ par suite du manque de parcelles témoins exemptes de métalloïde mais facilement constatés dans des expériences en vases. Dans ces dernières, l'arsenic se révèle toxique à partir d'une concentration de 0,01 p. 100.

Les travaux se rapportant à l'action directe de l'arsenic en tant qu'engrais catalytique sont assez nombreux et leurs résultats comme il arrive bien souvent avec les « oligo-éléments » contradictoires. Les plus importants de ces travaux effectués depuis un demi-siècle seront simplement énumérés en suivant l'ordre chronologique.

J. STOKLASA [278] (1897) à la suite d'expériences réalisées avec l'avoine conclut que si l'acide arsénique ne peut remplacer l'acide phosphorique dans la vie de la cellule, il est capable de produire des dérivés du furfurol et d'augmenter le développement des organes d'assimilation dans la plante.

R. BOUILHAC [279] (1899) observe que si, sur un certain nombre d'algues, l'acide arsénique cause un préjudice évident, il en influence cependant une: *Schizothrix lardacea*, plus favorablement que l'acide phosphorique.

W. E. BRENCHEY, dans son ouvrage « Inorganic Plant Poisons and stimulants » [87] (1914), rapporte que l'effet toxique de l'arsenic sur les plantes supérieures est beaucoup plus marqué avec l'acide arsénieux et ses composés qu'avec l'acide arsénique et ses sels. Cette observation déjà ancienne mentionnée au début du présent exposé est confirmée par l'auteur au moyen d'essais de culture en milieu liquide sur le pois et l'orge. Dans les expériences réalisées, il n'a pas été constaté d'effet favorable avec les petites quantités employées.

P. MAZÉ [105] (1915), dans son étude des éléments nécessaires au développement du maïs, attribue à l'arsenic une action plutôt nuisible à ce développement.

F. JADIN et A. ASTRUÉ [280] (1916), ayant effectué des dosages d'arsenic et en même temps de manganèse dans un grand nombre de plantes et dans différents organes de celles-ci [280 a] (1912-1914), déduisent de leurs résultats que ce métalloïde et ce métal ont une grande importance dans la cellule végétale, importance qu'ils estiment comparable à celle du phosphore.

R. COBET [281] (1919) constate que l'acide arsénieux à une concentration de 1/200.000 est fortement toxique pour les plantes, qu'il diminue et fait mourir les racines. Des concentrations plus faibles ne semblent pas favorables au développement.

J. STEWART et E. S. SMITH [282] (1922) ont expérimenté à la Station d'Utah l'arséniate disodique. Des cultures en pots de pois, radis, blé, pommes de terre, haricots réalisées sur un limon graveleux ont montré que le sel étudié avait, à de faibles concentrations, favorisé les plantes étudiées.

J. S. Mc HARGUE et O. M. SHEDD [121] (1930), à la Station du Kentucky, ont cultivé de l'avoine sur du sable purifié additionné de petites quantités de composés arsenicaux. D'après ces auteurs, l'apport d'arsenic augmente la récolte de la paille, mais diminue celle du grain, comparativement avec les résultats trouvés dans un essai avec manganèse seul.

E. HASELHOFF, F. HAUN et W. ELBERT [283] (1930), opérant sur l'orge d'été, avec l'arséniate de calcium incorporé à des sols sableux ou limoneux, n'ont observé aucun effet nuisible de l'arsenic introduit dans 3 séries d'essais à la dose de 0,001, 0,002, 0,003 p. 100. L'analyse des plantes n'a révélé dans celles-ci aucune trace de As.

L. SCHMITT [284] (1930) a ajouté à un sol léger non fumé et pauvre en chaux des doses croissantes d'arsenic (0 g. 01 à 0 g. 4 de  $\text{As}_2\text{O}_3$  pour 100 g. de sol) sous forme d'arsénite de sodium, d'arséniates de sodium et de calcium, afin d'étudier l'action de ces 3 composés sur la croissance du seigle. Il a constaté comme ses devanciers que l'arsénite de Na était le plus toxique, tandis que l'arséniate de Ca, difficilement soluble, provoquait des lésions moins graves, ce qui démontrait d'après cet auteur, que les sols empoisonnés par As pouvaient être désintoxiqués par le chaulage. Dans aucun cas, et comme les trois chercheurs précités, il n'a trouvé As dans les récoltes analysées. Ce qui confirmerait cette hypothèse, déjà émise, que l'action de As ne serait pas due à son absorption par la plante, mais bien plutôt, comme l'avait remarqué R. COBET, à un trouble apporté dans l'activité radicaire.

W. B. ALBERT et C. H. ARNDT [285] (1931) trouvent que l'addition de 1 p. p. m. d'arsenic à un sol retarde le développement des racines et des parties aériennes du pois à vache cultivé en serre. La croissance de plantes de coton cultivées en milieu liquide est diminuée notablement par 1/40.000 d'arséniate de potassium ajouté à la solution nutritive. Ce sel est cependant reconnu quatre fois moins toxique que l'arsénite de potassium.

A. H. MEYER [286] (1933-35), dans des expériences en pots effectuées avec le riz, incorpore diverses doses d'arséniate de calcium à un limon argileux et trouve qu'une quantité correspondant à 28 kg. à l'hectare réduit la récolte de 20 p. 100. Une application correspondant à 185 kg. à l'hectare la réduit de 60 p. 100. Cette action défavorable de l'arséniate de calcium n'est pas supprimée par l'apport d'une fumure complète.

R. S. YOUNG [39] (1935), dans ses expériences relatives à l'action des oligo-éléments sur le développement de la fléole, a observé sur cette plante une heureuse influence de l'arsenic aux concentrations de 0,1 et de 10 p. p. m.

A. M. HURD-KARRER [287] (1936) s'est préoccupé de l'effet inhibitoire possible du phosphore sur la toxicité de l'arsenic pour les plantes. Il a ajouté 30 p. p. m. d'arséniate de sodium à une solution nutritive dans laquelle se développaient des plantules de blé. Celles-ci ont péri du fait de la présence de l'arsenic, quand il y avait seulement dans le milieu 10 p. p. m. de P. Elles ont été endommagées quand il y avait 60 p. p. m. de P. Elles n'ont été que légèrement affectées quand la solution contenait 120 p. p. m. de P. Les résultats trouvés étaient les mêmes à pH 4 ou à pH 7.

Récemment, R. MUNGOMERY [288] (1938), envisageant l'influence de l'arsenic sur le développement de la canne à sucre, a constaté que des doses de 92 et 184 kg. à l'hectare détruisaient 60 à 70 p. 100 des cannes ; avec 230 kg. cette plante et aussi le sorgho avaient leur croissance définitivement arrêtée. L'application annuelle de petites quantités de As était d'abord inoffensive, mais peu à peu il se produisait une accumulation de ce métal-loïde, dont la toxicité devenait manifeste.

P. BOISCHOT et J. HERVIAUX [289] (1940) ont expérimenté sur des pommes de terre variété Industrie l'arséniate de soude apporté à la dose de 2 kg. par hectare. Ce sel s'est montré très légèrement dépressif, mais l'effet produit était cependant de l'ordre des erreurs d'expérience (0,5 p. 100). L'analyse des feuilles et des tiges n'a montré aucun enrichissement des végétaux en As, ce qui confirme les observations de plusieurs des auteurs précités. En 1941, P. BOISCHOT, J. HERVIAUX ont avec HURIEZ [289 a] répété leur essai, mais sur blé Vilmorin 27. Ils ont alors observé une augmentation du rendement en grain (de 18 p. 100) et en paille (de 4,7 p. 100).

## IODE

Après les importants travaux de A. CHATIN [290] (1850 à 1876), A. GAUTIER [291] (1899-1901), P. BOURCET [292] (1899), E. WINTERSTEIN [293] (1918), T. VON FELENBERG [294] (1923-24), notamment, montrant la présence de l'iode dans l'air, l'eau, les sols, les plantes ; après ceux de nombreux physiologistes montrant le rôle de ce métalloïde dans le métabolisme

animal et en particulier dans le fonctionnement de la glande thyroïde et la sécrétion lactée, beaucoup d'investigations ont été faites concernant son action sur les plantes. Ces recherches avaient pour but, en général, d'examiner les possibilités d'une élévation de la teneur en iode des végétaux par l'application au sol d'engrais iodés, plus qu'une augmentation par ces engrais du rendement pondéral des récoltes. Le plus souvent, cependant, les auteurs qui ont envisagé l'enrichissement en métalioïde se sont préoccupés également du second point de vue, le seul considéré dans ce chapitre. Leurs travaux seront donc cités ici au même titre que ceux des chercheurs ayant étudié l'iode, uniquement, comme engrais catalytique.

J. A. VOELCKER [295] (1900), à la Station de Woburn, a effectué pendant deux années des expériences en pots sur le blé, l'orge, la moutarde, le pois avec l'iodure/de sodium. Il a d'abord remarqué que ce sel retardait la germination et diminuait la proportion des graines germées. De plus, cet auteur a constaté qu'à une dose correspondant à 5 cwt. par acre, l'iodure de sodium faisait mourir les plantes. A la dose de 2 cwt. par acre, il ne paraissait pas avoir d'effet nuisible sur le blé et l'orge, mais il empêchait le développement de la moutarde ; par contre, il exerçait une légère action favorable sur celui du pois. Des essais effectués avec la betterave, pendant la deuxième année seulement, montraient que l'iodure de sodium, appliqué à la dose de 1 cwt. par acre, au moment de l'ensemencement, était toxique pour cette plante.

S. SUZUKI et K. Aso [239] (1903) ont observé que l'iodure de potassium à des doses extrêmement faibles produisait un effet favorable sur des plantes variées, notamment sur l'avoine et le radis. Ces auteurs ont préconisé comme engrais iodé convenable les cendres de varechs.

P. MAZÉ [105] (1915) a montré que l'iodé était nécessaire au développement du maïs dans une solution nutritive.

J. STOKLASA [296] (1924) s'est préoccupé tout particulièrement de l'influence exercée par l'iodé sur la betterave. Auparavant, il avait observé, comme d'ailleurs P. BOURCET, que les plantes se comportaient différemment en présence du métalioïde, selon la famille à laquelle elles appartenaient. Ainsi, par exemple, une solution nutritive contenant 0 g. 005 d'iodé (sous forme d'iodure de potassium) par litre était vénéneuse au bout de vingt-deux jours pour les Graminées, alors que les Papilionacées supportaient cette concentration pendant quarante-cinq jours. STOKLASA remarquait également que si les plantes pouvaient absorber par leurs racines, le métalioïde présent sous forme d'iodure, soit dans la terre arable, soit dans une solution nutritive, elles pouvaient également assimiler par leurs feuilles l'iodé qui se dégageait souvent des terres ayant reçu des engrais iodés.

Les essais végétatifs effectués d'abord en vases par l'auteur, avec la betterave à sucre lui, montraient que 0 g. 02 de I sous forme de IK ajoutés à 12 kg. de terre provoquaient un développement plus intense de la plante, des feuilles en particulier. Les résultats trouvés étaient les suivants :

RÉCOLTE DE 10 VASES EN PRÉSENCE DE TOUS LES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

|                               | SANS IODE | AVEC 0 g. 021 D'IODE PAR VASE |
|-------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Feuilles . . . . .            | 2.066 g.  | 2.246 g.                      |
| Racines. . . . .              | 1.390 g.  | 1.989 g.                      |
| Teneur saccharine % . . . . . | 17,1 %    | 17,3 %                        |

L'iodé était trouvé dans les plantes récoltées aux doses respectives de 0 mg. 90 par kilogramme de substance sèche dans les feuilles et de 0 mg. 60 dans les racines des plantes ayant reçu l'engrais iodé, de 0 mg. 32 et 0 mg. 15 dans les mêmes organes des plantes-témoins.

Ces essais repris sur champs d'expérience ont donné les rendements (à l'hectare) ci-après :

|                               | PARCELLES AYANT REÇU ENGRAIS IODÉ<br>(1 kg. 72 à l'état de IK à l'ha.) | PARCELLES<br>SANS IODE |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Feuilles . . . . .            | 405 quintaux                                                           | 374 quintaux           |
| Racines. . . . .              | 413 »                                                                  | 333 »                  |
| Teneur saccharine % . . . . . | 16,4 %                                                                 | 16,6 %                 |

Opérant aussi sur la betterave à sucre, E. UNGERER [297] (1925) a, par contre, obtenu avec l'iodure de potassium une diminution de la grosseur des racines et du sucre contenu.

O. Løw [298] (1926), appliquant l'iodure de potassium à la dose de 0 kg. 494 par hectare, a trouvé que celle-ci avait augmenté la production du millet de 28 p. 100 et celle de l'orge de 34 p. 100.

Si M. COTTON [299] (1930-31) constate que 1,27 p. p. m. d'iode sont nuisibles au développement du sarrasin en solution nutritive et que 40,1 p. p. m. font mourir les plantes en trois semaines, G. V. WENDT [300] (1930) trouve que des solutions diluées apportant le métalloïde à un sol, à des doses de 6 à 40 g. par hectare, ont provoqué de bonne heure l'apparition des fleurs chez les haricots et les pois notamment, et ont développé le système racinaire. Les plantes des parcelles traitées contenaient plus d'iode que celles des parcelles non traitées.

G. R. STEWART [301] (1930) rapporte que l'iode, en présence de cuivre, est très utile à la production de la canne à sucre à Hawaï.

K. SCHARRER et W. SCHROPP [302] (1931) constatent que de grandes quantités d'iodure, d'iodate ou de périodate de potassium ne sont pas favorables à la germination du blé, du riz, de l'orge et de l'avoine. De petites concentrations n'ont pas d'effet sur la récolte ou augmentent très légèrement celle-ci, tandis que de fortes doses la diminuent. La chaux contenue dans le sol a, d'après les auteurs, une grande importance, car elle transforme les composés iodés expérimentés en sels de calcium difficilement solubles. Dans leur action nuisible ces composés sont, par ordre décroissant de toxicité, l'iodure, l'iodate, le périodate et la sensibilité des plantes est dans cet ordre : avoine, blé, riz, orge, l'avoine étant la plus sensible et l'orge la moins.

F. STRÖBELE [303] (1931) déduit des expériences qu'il a effectuées en vases et au champ : 1° que l'iode n'a aucune influence sur le rendement ; 2° qu'en augmentant les doses de cet élément, on peut élever la teneur de la plante en celui-ci, mais que pour arriver à ce résultat les quantités à ajouter sont si fortes qu'elles ne présentent aucun intérêt économique.

A. B. BEAUMONT et E. B. HOLLAND [304] (1934), effectuant des cultures en pots, trouvent que l'emploi de 16 et 24 kg. par hectare d'iodure de potassium augmente la récolte des navets, mais non celle des épinards.

F. L. WYND [305] (1934), expérimentant sur milieu aqueux avec des plantes de tomate, ajoute 1, 5, 10 et 20 p. p. m. d'iodure de potassium à la solution nutritive utilisée et constate un effet dépressif sur le développement des plantes. La toxicité s'est manifestée par une perte de la couleur verte et une flétrissure progressive des plus petites feuilles. La respiration et l'activité diastasique qui ont diminué avec la plus faible concentration en iodure de potassium ont augmenté notablement avec les plus fortes concentrations, cette augmentation n'étant pas toutefois en rapport avec la toxicité de l'iode.

J. S. Mc HARGUE [306] (1936), opérant aussi avec des plantes de tomate, mais sur un sol, observe que les plantes se développent mieux quand ce sol contient 10 p. p. m. d'iode à l'état de IK que s'il en renferme 50 p. p. m., quantité qui paraît être le maximum toléré par la tomate dans le sol considéré.

Dans les expériences de R. S. YOUNG [39] (1935) sur la fléole, 0,1 à 10 p. p. m. d'iode ont eu un effet heureux, alors que 100 p. p. m. ont été toxiques.

MACK, B. WARREN et E. P. BRASHER [307] (1936), appliquant l'iodure de potassium à la dose de 5 kg. 9 à l'hectare, trouvent une augmentation

de la teneur en l'iode des haricots verts comparativement à celle de haricots développés sans cet élément, mais ce dernier réduit notablement la récolte. Des applications identiques du même sel augmentent cependant la récolte des navets et aussi l'iode contenu dans ces plantes.

Sur *Beta maritima*, R. VON VEGESACK [308] (1937) a observé une augmentation de rendement de 88 p. 100 du fait d'un apport par hectare de 1 kg. 920 d'iode (sous forme de IK), mais une dose de 8 kg. exerçait déjà une influence toxique. Des essais répétés pendant trois années avec 3 kg. 5 du métalloïde à l'hectare ont augmenté le rendement des betteraves sucrières d'environ 32.000 kg. pour cette superficie. Des résultats identiques ont été obtenus sur betterave fourragère et les feuilles de cette plante, riches en iode, données comme nourriture à des vaches ont provoqué une augmentation quotidienne en lait d'environ 4 litres chez chaque animal.

Sur pommes de terre, variété Industrie, P. BOISCHOT et J. HERVIAUX [289] (1940) ont observé, au contraire, avec 2 kg. d'iodure de potassium à l'hectare, une action légèrement dépressive de ce sel, mais celle-ci a été de l'ordre des erreurs d'expérience. Sur blé Vilmorin 27, ces auteurs ont obtenu en 1941 [289 a], avec la même dose d'iodure, un excédent de récolte de 5 p. 100 pour le grain et de 11,4 p. 100 pour la paille.

En dehors de ces apports directs d'iode au sol, cet élément peut être incorporé au dit sol involontairement par quelques engrais et notamment par le nitrate de soude du Chili qui, ainsi qu'on l'a vu précédemment, renferme une petite quantité d'iodate de sodium. Nombre d'auteurs se sont préoccupés de cet apport « accidentel » d'iode et ont comparé les effets de ce nitrate naturel avec ceux du nitrate de sodium synthétique dont l'emploi comme engrais tend à se développer.

H. EDDÉLBUHEL [309] (1928) estime que les nombreux essais culturaux effectués sont tout à fait contradictoires en ce qui concerne l'équivalence des deux nitrates et d'une façon générale l'application des fumures iodées. Si le plus souvent les iodures déterminent un accroissement de la teneur en iode des récoltes, la quantité de cet élément produisant un tel résultat est bien supérieure à celle fournie par une fumure normale de nitrate de soude du Chili.

E. G. DØRELL [310] (1928) trouve, lui, que la quantité d'iode présente dans le nitrate du Chili et parfois dans le superphosphate est suffisante pour produire une légère augmentation des récoltes. La même constatation en ce qui concerne le nitrate naturel seul est faite par F. WEISKE [311] (1930), par F. GIESECKE et K. SCHMALFUSS [312] (1938) sur les betteraves à sucre et fourragères notamment.

F. STRÖBELE (loc. cit) conclut de ses essais que l'iode n'existe pas en quantité suffisante dans le nitrate du Chili pour avoir une influence sur le développement des plantes.

La comparaison du nitrate de soude du Chili et du nitrate synthétique a été effectuée plusieurs fois dans les Stations Agronomiques françaises. Ch. BRIOUX (Rouen) [313] répétant en 1932 des expériences en pots effectuées en 1925 et 1926 qui avaient montré l'égalité des deux nitrates au point de vue de leur action fertilisante, trouve dans les nouveaux essais sur moutarde blanche et maïs une plus grande quantité de matière sèche avec le nitrate du Chili. En 1933 et 1934, M<sup>lle</sup> GAROLA (Chartres) [314] observe que ce nitrate est supérieur au nitrate synthétique pour des cultures de moutarde blanche, de radis, de carotte effectuées en vases. Par contre, l'efficacité des deux nitrates se montre équivalente sur le navet (en vases) et sur l'avoine cultivée tant en vases qu'en plein champ. Dans des essais effectués en 1935 [314 a] le nitrate naturel produit une action légèrement plus favorable sur la betterave sucrière (racines). Sur la même plante, E. DUPONT (Nancy) [315] (1933) n'observe aucune différence avec les deux nitrates. V. VINCENT (Quimper) [316] (1933) dans une expérience sur blé de printemps trouve que le nitrate du Chili a produit une légère augmentation du grain (indice 106) par rapport au nitrate synthétique (indice 100).

Outre l'iode contenu dans le sol ou apporté par des engrais, les plantes ont à leur disposition l'iode existant dans les pluies<sup>1</sup> et l'atmosphère<sup>2</sup>.

M. A. VON WRANGELL [317] (1930) a étudié l'action du métalloïde dans des expériences conduites de telle façon qu'il y ait impossibilité pour les plantes, d'emprunter ce dernier au sol et à la pluie. Ces expériences ont montré (comme celles de STOKLASA, citées plus haut) que la plante avait la faculté d'assimiler par ses feuilles de notables quantités d'iode, provenant d'un air riche en cet élément. Mais il n'a pas été constaté dans ces essais des modifications de rendement pour les plantes cultivées à l'abri de toute trace d'iode.

### CHROME

En 1907, A. HÉBERT [318] étudiait l'action du sulfate de chrome sur des graines bien germées (mais dont les cotylédons n'étaient pas épuisés) de pois, de colza et des grains de blé. Ces graines et grains, sortis de l'eau distillée où ils germaient, étaient transplantés dans des solutions à teneur croissante en sulfate de chrome. Jusqu'à 1 p. 1.000 de ce sel, l'auteur constatait que les plantes se développaient bien ou assez bien, mais à partir de 2 p. 1.000 une action toxique commençait à se manifester et avec des teneurs de 5 p. 1.000 et au delà, les plantules périssaient rapidement. Il en était ainsi pour les trois genres de plantes expérimentés. P. KENIG [319], un peu plus tard (1911), observait un effet nuisible de l'acide chromique et surtout de ses sels sur des plantes cultivées dans un milieu liquide ou sur des sols. Cet effet était moindre avec les autres composés du chrome employés à très petite dose et sur des plantes riches en silice et en acide oxalique; une action favorable a même parfois été observée. Des expériences de germination effectuées par cet auteur ont montré que l'effet nuisible du chrome semblait dépendre de la capacité d'absorption du milieu; il se manifestait davantage dans un milieu sableux que dans un véritable sol.

J. WOLFF [320] (1913) dans des expériences sur l'influence du fer sur le développement de l'avoine a remarqué que ce métal ne pouvait être remplacé par le chrome dans la constitution du milieu nutritif.

PFEIFFER, SIMMERMACHER et RIPPEL [321] (1918) ont étudié en pleine terre sur l'avoine et l'orge l'influence de différents composés du chrome renfermés dans un minéral de fer et chrome. Si dans certains cas les résultats ont été favorables, dans d'autres au contraire l'apport a été nuisible et les auteurs n'ont pu conclure à un emploi utile des composés du chrome dans la pratique agricole.

J. A. VÆLCKER [245] (1921), dans des expériences en pots, a examiné l'influence exercée par le chromate et le bichromate de potassium sur deux récoltes d'orge. Il a constaté, durant la seconde année, un effet plutôt heureux, la dose employée étant de 0,01 p. 100 de chrome. Avec 0,025 p. 100, l'action était nuisible et se prolongeait pendant cette seconde année de façon très marquée, le bichromate étant d'ailleurs plus toxique que le chromate.

Dans des expériences faites sur le blé, un apport de 0,005 p. 100 de chrome sous l'une ou l'autre forme s'est montré toxique, mais à des doses inférieures à 0,005 p. 100 de Cr les deux sels ont exercé une influence favorable.

En 1935, J. D. NEWTON et A. D. PAUL [322] étudiant l'action du bichromate de sodium comme herbicide et appliquant ce sel sur une série de

---

1. J. F. MC CLENDON et A. WILLIAMS (*The Journ. of the Amer. Med. Assoc.*, 80, 1923, p. 600) aux Etats-Unis, ont dosé dans l'eau de pluie 0 mg. 012 par mètre cube à 3 milles de la côte et vers les lacs Érié et Ontario seulement 0 mg. 0004 par mètre cube.

2. A. GAUTIER [291] (1899) a trouvé à Paris 0 mg. 0013 d'iode sous forme de poussières organiques par mètre cube d'air et en mer à 60 milles des côtes 0 mg. 0167 également par mètre cube d'air.

parcelles en jachère et sur une autre série cultivée en blé feront des constatations du même ordre. Si la récolte de cette seconde série est réduite la première année, il n'en est pas de même l'année suivante, car le sel est décomposé et perd assez rapidement sa toxicité dans le sol.

E. HASELHOFF, F. HAUN et W. ELBERT [323] (1930) ont observé qu'une addition de chrome au sol avait exercé une action nuisible sur le rendement de l'orge d'été et de la moutarde, bien que les doses employées n'aient pas dépassé 0,003 p. 100. Cette action nuisible était d'ailleurs beaucoup plus sensible avec l'acide chromique qu'avec l'hydrate de chrome ; elle était aussi plus intense en sols sableux qu'en sols de limon.

K. SCHARRER et W. SCHROPP [324] (1935) ont effectué avec des graines ou grains variés des essais de germination sur milieu sableux stérile additionné de quantités de chrome (à l'état de sulfate) variant de  $10^{-10}$  à 100 mg. pour 800 g. de sable humecté avec 320-350 cm<sup>3</sup> d'eau.

En dix-vingt jours, les petites doses jusqu'à  $10^{-4}$  mg. ont favorisé légèrement la croissance des plantules. Même avec 100 mg. de Cr la germination du seigle, de l'avoine, de l'orge a eu lieu normalement ; avec la même quantité, la germination du blé a été un peu entravée, tandis que celle du pois l'a été sérieusement.

Des expériences de culture en milieu liquide (2 l. solution de Richter additionnés de  $10^{-10}$  à 100 mg. de Cr à l'état de sulfate) avec des plantules de blé ont été également réalisées par les mêmes auteurs et ont montré une action favorable du chrome, lorsque la quantité de cet élément ne dépassait pas 1 mg. dans le milieu ; cette action devenait nuisible avec 10 mg. et se révélait particulièrement toxique avec 100 mg. Une chlorose se manifestait lorsque l'apport était de  $10^{-4}$  à  $10^{-1}$  mg. de Cr. Ces expériences ont été répétées avec des additions similaires de Cr à l'état de chromate de sodium ; avec ce sel les résultats ont été identiques aux précédents.

R. S. YOUNG [39] (1935) a observé une influence favorable de 10 p. p. m. de chrome sur la fléole.

O. FALLADA [325] (1938) estime que des traces de ce métal sont essentielles pour le développement de la pomme de terre, de la tomate et du tabac.

## MANGANÈSE

Si le manganèse figure dans la composition du « mélange de principes nutritifs capable de faire prospérer une plante à chlorophylle non parasite » indiquée par J. SACHS dans son célèbre traité de *Physiologie végétale* (1868), il ne semble pas cependant que l'illustre physiologiste de Würzburg soit absolument sûr de l'efficacité de ce métal, puisqu'il fait suivre sa mention du mot « nécessaire » accompagné d'un point d'interrogation [28 a]. Cette incertitude trouve son explication dans ce fait que vers 1860, SACHS, très frappé par la présence du manganèse dans les plantes signalée dès 1774 par C. SCHEELE [326] et ensuite par nombre d'auteurs (Th. DE SAUSSURE [327] (1804), SALMS-HORSTMAR [328] (1849), J. LIEBIG [329] (1852), notamment), avait essayé sans y parvenir de montrer avec sa méthode de culture en solutions salines l'utilité de cet élément dans la nutrition des plantes supérieures, utilité pourtant qu'il présumait. J. RAULIN ne sera d'ailleurs pas plus heureux, vers 1870, lorsqu'il cherchera à savoir si le manganèse intervient dans le développement de l'*Aspergillus niger* [20 b].

Ces insuccès obtenus par deux expérimentateurs très habiles devaient être expliqués longtemps après par Gabriel BERTRAND, à qui revient le mérite d'avoir établi de façon certaine le rôle utile du manganèse aussi bien dans la vie des phanérogames que (avec M. JAVILLIER [334] (1911)) dans celle de la moisissure étudiée tout particulièrement par RAULIN. D'après G. BERTRAND, en effet, « presque tous les sels même les plus purs fournis par le commerce renferment des traces de manganèse et il est à peu près sûr que SACHS et RAULIN introduisaient, sans le savoir, ce métal dans tous leurs

milieux de culture. D'autre part, comme les plantes n'utilisent le manganèse qu'en quantités infimes, il est possible qu'elles en aient trouvé assez dans les milieux témoins préparés par SACHS et RAULIN pour qu'une addition volontaire soit alors restée sans effet appréciable [20]. La solution du problème qui n'a pu être obtenue à l'origine par la méthode des cultures devait découler de l'étude d'une question tout à fait différente, celle des oxydations diastatiques entreprise par Gabriel BERTRAND, de 1894 à 1897.

En étudiant l'oxydation du latex de l'arbre à laque du Tonkin, *Rhus succedanea* L., G. BERTRAND constatait, en effet, la présence du manganèse dans la diastase réalisant le phénomène. Il observait, d'autre part, l'action du métal dans le fonctionnement chimique de cette « laccase » qui sans manganèse perdait la propriété d'agir comme fixatrice d'oxygène [335]. La « laccase » étant universellement répandue chez les végétaux où elle jouait le rôle capital d'intermédiaire entre l'oxygène contenu dans l'atmosphère et diverses substances organiques (tanin par exemple) renfermées dans les cellules, il en résultait d'après G. BERTRAND que les végétaux avaient besoin de manganèse et cet auteur pensait immédiatement à l'utilisation de l'élément en agriculture. En 1903, au V<sup>e</sup> Congrès international de Chimie appliquée à Berlin [30] il concrétisait cette pensée en proposant l'étude et l'application des « éléments catalytiques » comme engrais complémentaires. En 1906, au VI<sup>e</sup> Congrès à Rome [336] et en 1909 au VII<sup>e</sup> à Londres [31], il faisait part des résultats très démonstratifs qu'il avait obtenus avec le manganèse dans les conditions de la grande culture.

En collaboration avec un agronome distingué, L. THOMASSIN, G. BERTRAND avait en effet effectué, en 1905 [337], une expérience particulièrement probante. Celle-ci avait porté sur une culture d'avoine réalisée sur un sol argileux faiblement calcaire, qui malgré sa teneur en manganèse relativement élevée (0,057 p. 100) recevait une dose de 50 kg. de sulfate de manganèse à l'hectare. L'augmentation de récolte obtenue par cet apport fut de 17,4 p. 100 pour le grain et de 26 p. 100 pour la paille. Le poids de l'hectolitre de grain passait de 44 kg. dans la parcelle-témoin à 46 kg. 500 dans celle ayant reçu du manganèse.

Antérieurement, ou à peu près au même moment, cette intervention du manganèse dans la nutrition végétale avait été pressentie, par ailleurs.

Si en 1884 MAUMENÉ [330], dosant le métal dans différents produits végétaux (céréales, légumes, fruits), considérait sa présence comme accidentelle, en 1889 le Comité consultatif des Stations Agronomiques et Laboratoires agricoles, à propos de la méthode officielle d'analyse des terres qu'il recommandait, faisait cette remarque en ce qui concerne le dosage du manganèse dans les sols : « Le manganèse existe dans toutes les plantes et sa présence en petite quantité semble nécessaire à la végétation [331]. » En 1898, P. PICHARD [332], perfectionnant la méthode de dosage de A. LEClerc [333] (qui déjà, en 1872, avait décelé le métal à l'état de traces dans beaucoup de terres arables et matières végétales), montrait la présence universelle du manganèse dans le règne végétal et dans le règne animal et faisait ressortir que cet élément paraissait se concentrer dans les plantes en activité végétative, ce qui le conduisait à signaler « le rôle important que le manganèse pouvait remplir surtout au début de la vie de la plante, germination et premier développement ».

Entre 1898 et 1900, J. M. SAULNIER [338], expérimentant au champ d'essai du Prof. I. GIGLIOLI, à Suessola, en Italie, et ayant, sur 8 séries de plates-bandes cultivées en blé, ajouté du bioxyde de manganèse à divers engrais usuels (fumier, nitrate de soude, superphosphate, sulfate d'ammoniaque) obtint des résultats favorables sur 4 séries, l'action utile se manifestant d'ailleurs davantage sur le grain que sur la paille.

Sans vouloir diminuer l'importance de ces constatations, il n'en reste pas moins que ce sont les expériences de G. BERTRAND, expériences au champ et surtout expériences de laboratoire, évoquées ci-dessus qui ont été à l'origine des nombreux essais entrepris un peu partout en Europe, au Japon, pour examiner l'influence du manganèse sur le développement des plantes. H. ROUSSET, en 1909 [339], H. BARTMANN, en 1910 [340]

et surtout A. OLARU, en 1920 [341] ont particulièrement bien analysé ces premiers et très nombreux travaux. Il n'apparaît pas utile de recommencer cette tâche et seulement seront rappelés ici pour mémoire les noms des auteurs.

En général, dans les cultures sur terre en pots ou au champ, les résultats obtenus par ces derniers ont montré l'action favorable du manganèse sur le rendement et aussi la qualité (voir plus loin) des récoltes. Si dans certains essais les effets ont été peu marqués, rares ont été les expériences négatives. Dans celles-ci d'ailleurs, ce n'était pas le plus souvent l'influence du métal qui pouvait être mise en cause, cette influence étant incontestable, mais bien plutôt la dose ou la forme utilisée et aussi, ainsi qu'il sera dit plus loin, la réaction du milieu auquel il était incorporé. Dans quelques cas, cette dose pour le manganèse comme pour d'autres « oligo-éléments » a été trop forte. Dans d'autres la forme employée était peu appropriée. C'est ainsi que les oxydes se sont montrés parfois inefficaces. Le sulfate ou le chlorure ont eu un effet souvent douteux, mais par contre le carbonate et surtout la chaux manganésée ont exercé presque toujours une action utile.

Dans les cultures effectuées en milieu liquide, le manganèse, à des doses convenables, a aussi le plus souvent favorisé le développement des plantes.

Toutes ces expériences ont été réalisées avec les espèces les plus diverses. C'est ainsi qu'au Japon, à l'Institut impérial agronomique de Tokio où les premiers essais systématiques ont été effectués par O. LÆW et ses élèves, celui-ci avec S. SAWA [342] (1902-03) obtint pour des doses de manganèse de 0,002-0,02 p. 100, en solution ou avec de la terre dans des cultures en pots, une végétation plus abondante de l'orge, des haricots, du blé, du pois, des radis, des choux. Sur *Cryptomeria Japonica*, O. LÆW et S. HONDA [343] (1904) observèrent sur des plants d'un an un développement en hauteur double, pour les plants manganésés. M. NAGAOKA [344] (1903-1904), K. ASO [345] (1904-1907) constatèrent qu'un très petit apport de manganèse augmentait notablement les récoltes de riz. Y. FUKUTOME [346] (1904) sur le lin ; T. KATAYAMA [347] (1906) sur l'avoine, le riz, l'orge et le blé ; S. KAKEHI et K. BABA [242] (1907) sur l'orge également et le pois ; S. UCHIYAMA [241] (1907) sur un grand nombre de plantes, notamment l'orge, le blé, le millet, les haricots, les fèves ; T. TAKEUCHI [348] (1909) sur l'épinard, le pois, l'orge, le lin, trouvèrent aussi de notables excédents de récolte du fait d'une très petite addition de manganèse au milieu de culture. En Europe, des résultats confirmant ceux obtenus au Japon furent trouvés entre autres par J. A. VOELCKER [349] (1904) avec le blé et l'orge, A. GRÉGOIRE, I. HENDRICK et E. CARPIAUX [350] (1907) avec la pomme de terre, M. DE MOLINARI et O. LIGOT [351] (1907) avec l'avoine, G. SALOMONE [352] (1907) avec l'avoine, l'oignon, l'ail, C. V. GAROLA [353] (1907) avec le lin, VAN STEYN et BURGERS [354], W. F. SUTHERST et H. INGLE [355] (1908) avec le maïs, Z. BONOMI [356] (1908) avec la féverole, NAMBA [357] (1908) avec les oignons, P. LEIDREITER [358] (1910) avec l'avoine, la moutarde, la betterave, la pomme de terre, H. BARTMANN [359] (1910) également avec la pomme de terre et la betterave, ainsi qu'avec le maïs-fourrage, les navets, les pois, les haricots, J. STOKLASA [360] (1911) avec la betterave à sucre, G. MASONI avec le lupin [361] (1911) et le maïs [361 a] (1915), A. ANDOUARD [362] (1911) avec le blé et les haricots, T. PFEIFFER et E. BLANCK [363] (1912) avec l'avoine, H. CLAUSEN [364] (1913) avec la même plante.

V. VON BAUER, en 1909 [365], examinant plus particulièrement l'influence du manganèse en floriculture, trouva que ce dernier fournissait à des plantes comme les coleus, géraniums, fuchsias, phœnix, chamcerops, latanias, etc..., eut un effet si favorable que les plants d'un an ayant reçu ce métal, ne se distinguaient pas des plants de deux ans non pourvus. La floraison des plants manganésés fut de plus beaucoup avancée.

Une mention spéciale doit être faite des expériences en pots très précises poursuivies pendant quatre années consécutives (de 1908 à 1912) par E. BOULLANGER [366]. Cet auteur observa l'influence des sels de manga-

nèse : 1° en 1908, sur les pommes de terre ; 2° en 1909 sur les pommes de terre et l'orge de brasserie ; 3° en 1910, sur l'avoine, les pois et le trèfle ; 4° en 1911, sur les plantes potagères. Les premiers essais effectués avec le chlorure de manganèse à la dose de 1 g. pour 40 kg. de terre sur deux sols différents : un sol pauvre, siliceux, et un sol riche, argileux, ont montré dans les deux cas une augmentation du poids des tubercules de pommes de terre, mais celle-ci était bien plus considérable (32 p. 100) dans le sol riche que dans le sol pauvre (7 p. 100). Quand ce dernier recevait un engrais complet, l'augmentation atteignait 34 p. 100 par rapport au témoin recevant la même fumure sans manganèse, ce qui semble prouver que ce métal permettait une utilisation plus active des éléments fertilisants ajoutés. Si les essais suivants sur l'orge ont été négatifs, ceux réalisés avec l'avoine, le pois, le trèfle ont fait apparaître le rôle important des engrais potassiques comme adjuvant des engrais manganésés. Dans les cultures potagères, l'action exercée par le sulfate de manganèse a été considérable sur la carotte, le céleri, la laitue, l'oseille et la betterave ; sensible sur les épinards, elle a été douteuse ou nulle sur l'oignon, la chicorée et le haricot.

Parmi les expériences déjà anciennes ayant montré l'heureux effet du manganèse sur le développement des plantes, il faut citer celles de J. LABERGERIE sur le blé et *Solanum commersonii* [367] (1907) dans lesquelles l'auteur, avant E. BOULLANGER, avait remarqué que sur cette dernière plante le sel de manganèse ne produisait son effet que lorsqu'il y avait apport d'engrais potassique, celles de J. LABERGERIE encore [367 a] (1913) et qui sont plus connues, sur la vigne et la production du raisin, expériences dont il sera de nouveau parlé plus loin à propos de l'action des oligo-éléments sur la qualité des récoltes. Il faut mentionner aussi celles de J. J. SKINNER et M. X. SULLIVAN [368] (1914) faites sur le blé avec les chlorure, sulfate, nitrate, carbonate et bioxyde de manganèse, tous ces composés se montrant utiles aux doses de 5 à 50 parties de manganèse par million de sol ; celles de P. MAZÉ [34] (1914) sur le maïs, de G. IPPOLITO [369] (1914) sur le blé et la luzerne, de R. RICCI et G. BARBARA [370] (1915) sur le blé également, de P. POLI [371] (1915) sur le riz, de F. J. CHITTENDEN [372] (1915) sur les navets, de B. SCHULZE [373] (1915), de O. FAL-LADA et J. K. GREISENEGGER [374] (1915) sur la betterave à sucre, de W. E. TOTTINGHAM et A. J. BECK [375] (1916) sur le blé, de M. POPP [376] (1916), de L. HILTNER et G. KORFF [377] (1917) sur l'avoine, de H. G. SODERBAUM [378] (1918) sur la même plante, les pois et les haricots, de E. P. DEATRICK [379] (1919), J. S. Mc HARGUE [380] (1919) sur le blé.

Dans ces vingt dernières années, nombreux ont été également les essais confirmant l'utilité du manganèse pour la production des récoltes. Il est absolument impossible de les citer tous et, dans la nécessité de choisir, seuls les plus connus seront évoqués. Parmi ces derniers, une place à part revient à ceux de O. SCHREINER et P. R. DAWSON [381] (1927) qui montrent un exemple des questions qui peuvent se présenter avec l'emploi d'engrais chimiques purs de fabrication moderne, dans des sols qui manquent de certains éléments dits « secondaires » mais cependant essentiels pour la croissance des plantes.

Ces auteurs ont constaté qu'un sol fortement calcaire de clairière dans la contrée de Dade (Floride) et qui était affecté à la culture des tomates ne donnait plus de récolte, même avec une forte application d'engrais minéraux, si l'on ne fournissait pas de fumier aux jeunes plantes. Expérimentant en serre, SCHREINER et DAWSON ont ajouté à ce sol 25 à 51 p. p. million de manganèse sous forme de sulfate, avec un engrais minéral complet. Les plants de tomate développés sur ce sol ont eu une croissance normale et vigoureuse et une fructification adéquate, tandis que sur le même sol, dans des conditions identiques, mais sans manganèse, les plantes ont été retardées dans leur croissance, n'ont pas fleuri et ont été atteintes d'une chlorose caractéristique qui disparaissait cependant rapidement après une application de l'« oligo-élément ». Des expériences effectuées en plein champ ont produit une augmentation tout aussi marquée de la croissance et du rendement en fruits, du fait d'un apport de manganèse.

J. J. SKINNER et R. W. RUPRECHT [382] (1928) expérimentant également sur un sol de Floride très calcaire ont trouvé de leur côté qu'une dose de 50 à 100 kg. de sulfate de manganèse par hectare, ajoutée au compost de tourbe appliqué comme engrais, doublait presque la production des tomates.

Quelques années après, C. R. IYER, R. RAJAGOPALAN et N. SUBRAHMANYAN [383] (1934) constatent aussi que la récolte des fruits de tomate est doublée quand ils ajoutent Mn (à l'état de bioxyde) aux autres éléments fertilisants introduits dans le sol.

Par contre, sur un limon sableux de la Caroline du Nord, C. WILLIAMS [384] (1930) observe que le soja n'est que très légèrement favorisé par l'addition à l'engrais d'une dose de sulfate de manganèse correspondant à 110 kg. par hectare. Mais si l'on ajoute au sol du calcaire, il y a une augmentation considérable de la récolte.

S. D. CONNER [385] (1932) fait une constatation un peu analogue avec l'avoine dont le développement se trouve favorisé par le sulfate et aussi le chlorure de manganèse, seulement quand le sol est neutre ou alcalin.

J. S. Mc HARGUE et O. M. SHEDD [121] (1930) opérant aussi sur l'avoine, à la Station expérimentale du Kentucky, trouvent que cette plante cultivée sur sable bénéficie d'un apport de pyrolusite ( $MnO_2$ ) au milieu nutritif de base, en ce qui concerne la production du grain. La récolte de paille, par contre, n'est pas augmentée.

K. SCHARRER et W. SCHROPP [386] (1934) effectuant des cultures sur milieu sableux imprégné de la solution de Richter, ajoutent à celui-ci des doses de manganèse (à l'état de sulfate) variant de  $10^{-10}$  à 10 milli-équivalents pour 800 g. de sable. Dans ces conditions, les auteurs observent que le manganèse a favorisé la croissance du blé aux doses de  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$  et  $10^{-1}$  milliéqu. 10 milliéqu. du métal ont été toxiques. Avec le riz, l'orge, l'avoine, le maïs des résultats similaires sont obtenus. Avec le pois le maximum de développement est atteint par l'addition de  $10^{-5}$  milliéqu. et la toxicité devient considérable avec 1 milliéqu.

Sur milieu sableux encore, R. J. MUCKENHIRN [150] (1936) trouve que le manganèse favorise la croissance du sarrasin. Dans des cultures en pots faites sur sol tourbeux, cet auteur observe la même influence favorable de Mn sur le développement des oignons. Au champ, toujours sur sol tourbeux, un apport de métal a augmenté la récolte des pommes de terre.

En milieu aqueux, B. N. SINGH et S. PRASAD [387] (1936) constatent que sur le blé le chlorure de manganèse exerce une action utile à la dose de 0,0001 M., légèrement toxique avec 0,0005 M, très toxique lorsque la concentration est plus élevée. En milieu aqueux également M. TOKUOKA et M. HITOSHI [129] (1937) remarquent que l'addition de 0,1 p. de Mn p. million augmente la récolte du radis, mais qu'au-dessus de cette concentration le métal devient toxique.

L'influence favorable du manganèse a encore été observée par T. E. ODLAND et F. K. CRANDALL [388] (1932) sur épinards, betterave, laitue, tomate, pomme de terre ; par C. BRIOUX et E. JOUIS (1934) sur la moutarde blanche [389] et le sarrasin [253], par H. P. COOPER, W. D. MOORE et R. WALLACE [390] (1934-35) sur la pomme de terre ; par R. S. YOUNG [39] (1935) sur l'avoine et la fléole.

P. A. VLASSIUK [391] (1939) remarque que sur un sol fertilisé par apport de fumier et d'engrais minéraux, le manganèse appliqué dix à vingt jours avant les semailles à la dose de 3 à 4 kg. 5 à l'hectare, augmente la densité des tiges du blé d'hiver, favorise l'épaississement des cellules et contribue à accroître la résistance de la céréale à la verse. Des essais poursuivis pendant deux ans ont montré une augmentation de récolte de 53 à 113 p. 100.

Cette action utile du manganèse sur la végétation constatée par tant d'auteurs semble se manifester au début même de la vie de la plante. Le métal, en effet, paraît favoriser et accélérer notablement la germination, ainsi que l'ont constaté H. MICHEELS et P. DE HEEN [392] (1906) sur le

blé avec une solution colloïdale de manganèse ; P. CHANCEREL [393] (1913) sur les graines de pin maritime avec le sulfate de manganèse ajouté à la dose de 250 g. pour 10 kg. de sable ; J. CROCHETELLE [394] (1913) sur les graines de betterave, d'avoine, de pois, de colza, avec ce même sulfate aux doses de 5/10.000 et de 8/10.000 ; L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY [395] (1917) sur le pois, avec le chlorure à la concentration de 200 mg. par litre ; J. STOKLASA [396] (1918) sur le blé, le pois, l'orge, le *Lepidium sativum*, avec le chlorure également, à la concentration de 0,0001-0,0005 du poids atomique de Mn ; A. DEMKINA [397] (1934) sur les graines de lin avec une solution de sulfate de manganèse à 1 p. 100 ; A. ZLATAROFF [398] (1934) sur les graines de pois chiche et d'arachide, avec une solution du même sel à 0,5 p. 100. D'après ce dernier auteur, cet effet sur la germination serait dû au rôle de coenzyme joué par le manganèse, le métal accélérant dans les graines l'utilisation des réserves nutritives. Il y a lieu cependant de noter que F. ALLEMEYER [399] (1912) qui a particulièrement étudié l'influence du manganèse sur la germination avec le sulfate, le carbonate et le bioxyde aux doses de 0,001, 0,005, 0,01, 0,02, 0,05, 0,1 p. 100, n'a pas observé une action bien nette de l'élément sur le seigle, le blé, l'orge, le pois. U. VARVARO [400] (1912) a remarqué de son côté, que l'oxyde de manganèse retarderait plutôt la germination des haricots. SIGMUND [401] (1906-1907) antérieurement avait observé que le sulfate de manganèse en solution à 0,5 p. 100 favorisait la germination du pois, mais retardait celle du colza et de la navette.

Il semble que le développement des racines soit en rapport étroit avec la quantité de manganèse existant dans le milieu où elles pénètrent. Mais les expériences sur le sujet sont assez contradictoires. Si dans des expériences sur le blé effectuées en pots, avec de la terre, J. A. VOELCKER [402] (1904) remarque que les sels de manganèse ont produit un petit nombre de racines longues et très effilées, W. E. BRENCHEY [403] (1910) observe que l'orge, cultivée en milieu liquide, a eu son système racinaire particulièrement développé du fait de l'addition à ce milieu de traces de sulfate de manganèse.

De même si W. E. TOTTINGHAM et A. J. BECK [375] (1916) trouvent qu'en milieu liquide également (solution de Knop) le chlorure de manganèse même à petites doses est nuisible au développement des racines du blé, par contre B. E. GILBERT et F. E. PEMBER [404] (1931) constatent que de petites quantités du métal augmentent les racines du trèfle rouge cultivé en solution nutritive.

Si d'après W. T. Mc GEORGE [405] (1925) le manganèse présent dans les sols acides de Hawaï n'a pas d'action sur le développement des racines de la canne à sucre, dans les expériences de J. P. MARTIN [406] (1935) effectuées en milieu liquide, cet élément à la dose de 0,25 p. de Mn p. m. (sous forme de sulfate) donne à la même plante des racines exceptionnellement vigoureuses.

F. C. GERRETSEN [407] (1937), dans un travail assez récent sur une maladie de l'avoine par carence en Mn dont il sera question plus loin, note que cette déficience en manganèse de la plante est une cause de la réduction de son système racinaire.

D'après L. DELAVIGNE et QUARTAROLI [408] (1932) le métal joue un rôle essentiel dans la respiration des racines.

Une relation certaine existe également entre le manganèse et le phénomène d'assimilation chlorophyllienne.

Dès 1907, W. VAN DAM [409] constatait que des plantes développées dans des solutions contenant du sulfate de manganèse avaient des feuilles plus vertes qu'à l'état normal.

A. CARLIER et H. CLAUSEN [410] (1910) appliquant ce sel sur l'herbe de prairie faisaient une observation analogue. Cette influence du métal sur la photosynthèse fut étudiée tout particulièrement par L. MONTE-MARTINI [411] (1911) qui, expérimentant sur des feuilles de vigne, de lupin, de haricot, de pomme de terre notamment avec des solutions diluées de sulfate de manganèse trouva que ce dernier exerce une action stimulante

sur le phénomène, plus prononcée d'ailleurs que sur la respiration étudiée en même temps.

Les travaux de J. S. Mc HARGUE [412] (1926) font ressortir également le rôle important joué par le manganèse sur la production de la chlorophylle et aussi sur l'assimilation du carbone.

F. C. GERRETSEN [413] (1935) remarque aussi l'intensification de la photosynthèse par le manganèse. Il pense que l'absence de ce métal retarde le phénomène et cause un déficit de glucides.

Ces observations trouvent d'ailleurs leur confirmation dans les déterminations du manganèse dans les différentes parties des plantes faites par plusieurs auteurs et qui montrent que cet élément est surtout localisé dans les feuilles et autres organes chlorophylliens (J. STOKLASA [414] (1911); F. JADIN et A. ASTRUC [415] (1912); W. B. S. BISHOP [416] (1928)). Les dosages de G. BERTRAND et M. ROSENBLATT [417] (1932) sont peut-être d'ailleurs à cet égard les plus démonstratifs. Effectués sur les feuilles vertes et sur les feuilles étiolées d'un même végétal (pissenlit, laitue, chou, céleri, etc.) ils l'ont vu, en effet, nettement que les premières sont les plus riches en manganèse.

La déficience en manganèse du milieu dans lequel les plantes se développent produit d'ailleurs une chlorose caractéristique, la « chlorose manganique » observée tout particulièrement par P. MAZÉ [34] (1914) sur le maïs cultivé en solution nutritive. Au bout de peu de temps, les feuilles de cette plante privée du métal deviennent étroites, longues, peu turgescentes et tombantes. Les deux bords du limbe sont régulièrement ondulés. La couleur verte, moins foncée que chez les plantes-témoins, s'atténue à mesure que le nombre de feuilles augmente. Puis bientôt les feuilles diminuent de surface et de longueur, la végétation devient languissante. Parvenue au terme de celle-ci, la plante présente un port qui rappelle le bambou, surtout par la forme des feuilles supérieures, mais à aucun moment les feuilles n'ont été privées de chlorophylle.

Cette chlorose en ce qui concerne les plantes développées sur des sols est d'ailleurs en relation avec l'alcalinité de ces derniers, la déficience en manganèse assimilable se rencontrant plus communément dans les sols alcalins ou neutres.

B. E. GILBERT et F. T. Mc LÉAN [418] (1928) ont observé ladite chlorose sur le maïs, le haricot, l'épinard, l'oignon; H. E. HONEYWILL et R. A. DUTCHER [419] (1930) sur l'épinard également; G. WILLIS [420] (1928), C. B. WILLIAMS [384] (1930) sur le soja; H. A. LEE et J. S. Mc HARGUE [421] (1928), H. J. JENSEN [422] (1936), sur la canne à sucre; I. C. HOFFMAN [423] (1930) sur la tomate et le concombre; J. J. SKINNER et R. W. RUPRECHT [382] (1930) sur la tomate encore, la pomme de terre, le haricot, le chou, le chou-fleur, la carotte, la betterave, le maïs; D. A. VAN SCHREVEN sur la pomme de terre [146] (1935) et sur la betterave à sucre [424] (1936).

Cette chlorose par déficience de manganèse qui peut atteindre encore la fève (G. R. TOWNSEND et H. H. WEDGWORTH [425] (1936)), le tabac (J. E. Mc MURTREY jr [426] (1933), M. F. MORGAN et O. E. STREET [164] (1938)) le citronnier et l'oranger (A. R. C. HAAS [427] 1932), certaines plantes ornementales, telles que le bougainvillier, la myrte, le gohyavier, *Thunbergia grandiflora*, *Agyneja impubes* (R. D. DICKEY et W. REUTHER [428] 1938), disparaît par l'application au sol de sulfate de manganèse.

En 1909, B. SJOLLEMA et J. HUDIG [430] observaient, dans les provinces de Groningue et de Drenthe en Hollande, que l'avoine développée sur certains sols de tourbières fortement chaulés était atteinte d'une maladie caractérisée par des taches apparaissant sur les feuilles au printemps, ces dernières devenant peu à peu molles, se pliant vers le milieu et finissant par se dessécher. Les auteurs constataient que le sulfate de manganèse incorporé au sol à la dose de 50 à 100 kg. par hectare arrêta radicalement la maladie. H. CLAUSEN [364] (1912) faisait une observation analogue. La maladie des « taches grises » (« Grey-Speck », « Dorrflckenkrankheit ») de l'avoine étudiée particulièrement par G. SAMUEL et C. S. PIPER [431]

(1928), D. W. DAWIES et E. T. JONES [432] (1931), W. B. ALBERT [433] (1931-1934), A. S. WILD [434] (1934), J. J. MASCHRAUPT [435] (1934) et combattue avec succès par ces auteurs, au moyen du sulfate de manganèse serait, d'après F. C. GERRETSEN [413] (1935), une infection bactérienne en relation avec la carence du sol en manganèse.

Le « Marsh-Spot » des pois, maladie sévissant aussi en Hollande sur les sols trop alcalins et disparaissant par l'application de sulfate de manganèse, résulterait de même d'une déficience du milieu en ce métal (H. G. PETHYBRIDGE [436] (1935), M. P. LÖHNIS [437] (1936), C. KOOPMAN [438] A. ÖVINGE [439] (1937), S. G. HEINTZE [440] (1938), A. H. LEWIS [441], H. L. G. DE BRUYN [442] (1939)).

Le sulfate de manganèse, remède à la chlorose, peut, fait sans doute paradoxal, produire lui-même cette chlorose, lorsqu'il est fourni aux plantes en trop grande abondance, ainsi que l'ont montré A. RIPPEL [429] (1923) dans des expériences sur l'orge et D. A. VAN SCHREWEN [146] (1935) dans ses essais physiologiques avec la pomme de terre.

Le phénomène peut d'ailleurs être observé naturellement sans qu'il soit besoin d'apporter au sol le métal. Dans les sols acides, en effet, ce dernier existe à l'état soluble en quantité importante et de cette abondance résultent des manifestations chlorotiques comme celles constatées aux Iles Hawaï sur les plantations d'ananas par W. P. KELLEY [443] (1909-1912), E. V. WILCOX et W. P. KELLEY [444] (1912), O. M. JOHNSON [445] (1916-1924), W. T. Mc GEORGE [446] (1923) ou sur le tabac ture cultivé dans le Kentucky (C. E. BORTNER [447] (1935)).

Cette influence nocive ou simplement nulle du manganèse dans les sols acides a d'ailleurs été souvent observée. Dès 1907, H. VON FEILITZEN [448] (1907), expérimentant sur une tourbière très acide, à Flahult, en Suède, avec une dose de 10 kg. de sulfate de manganèse par hectare, constatait un effet dépressif de ce sel sur l'avoine.

J. J. SKINNER et F. R. REID [449] (1916) ayant appliqué sur un limon acide et pendant six années consécutives le sulfate de manganèse à la dose de 55 kg. à l'hectare, n'ont remarqué, pendant chacune de ces années, aucun effet de Mn sur le blé, le riz, le maïs, la pomme de terre. Plusieurs parcelles ayant été neutralisées avec de la chaux, pendant les trois années suivantes, les auteurs trouvent que Mn incorporé alors à celle-ci a augmenté la récolte des mêmes plantes, sauf celle des pommes de terre.

J. S. Mc HARGUE [450] (1923) n'hésite pas à affirmer que la présence des sels solubles de manganèse dans les sols acides est une des causes de la toxicité de ces sols et que l'application par surcroît de sulfate de manganèse abaisse le rendement des récoltes. Cependant, si l'acidité du sol est neutralisée par l'incorporation à ce dernier d'une certaine dose de carbonate de calcium, cet auteur, comme les précédents, trouve que le métal agit favorablement.

H. G. M. JACOBSON et T. R. SWANBACK [451] (1929) ont aussi observé des symptômes physiologiques anormaux sur des plantes de tabac cultivées en serre à la Station expérimentale de l'Etat de Connecticut et confirment que la nocivité remarquée provient de la forte teneur en Mn soluble existant dans le sol cultivé, teneur en relation avec l'acidité de ce dernier.

D'après R. H. CARR et P. H. BREWER [452] (1923) cette toxicité du métal dans les sols acides est évidente lorsque ces sols contiennent 0,006 à 0,008 p. 100 de Mn soluble dans une solution de sulfocyanate de potassium à 5 p. 100. Elle est très marquée lorsqu'ils renferment 0,015 à 0,03 p. 100 de Mn soluble dans le même réactif.

Ce rapport entre l'action du manganèse sur les plantes et la concentration en ions H du milieu a été étudié de façon très précise et confirmé au moyen de cultures effectuées en solutions nutritives par J. DAVIDSON [453] (1930) qui a expérimenté sur le blé, C. OLSEN [454] (1936) qui a opéré avec diverses plantes, l'orge notamment, L. C. KAPP [455] (1937), dont les essais ont porté sur le riz.

Puisque le rôle utile, essentiel, du manganèse en physiologie végétale a été, on a pu le constater, surabondamment démontré, il est possible

que les faits ci-dessus expliquent, tout au moins partiellement, divers résultats négatifs obtenus par quelques auteurs qui, sauf rares exceptions, semblent avoir simplement enregistré ces résultats sans en avoir recherché l'origine, que ces derniers aient été obtenus sur des sols ou sur des milieux artificiels.

S. RHODIN [456] (1908) dans une série d'essais en plein champ effectuée de 1902 à 1906, sur l'avoine, les pommes de terre, le tabac, ne remarqua aucun effet utile des divers sels de manganèse employés.

A. CARLIER et CLAUSEN [410] (1910), expérimentant aussi en pleine terre, avec des quantités variées de sulfate de manganèse ajoutées aux autres fertilisants, n'obtint non plus aucun excédent de récolte avec la pomme de terre et la betterave.

Dans des essais en pots, avec le tabac, F. MACH [457] (1910) ne constata aucune influence heureuse du sulfate de manganèse introduit avec les autres engrais aux doses de 0 g. 6 et 1 g. 2 pour 22 kg. de sol.

O. MUNERATI, G. MEZZADROLI et T. ZAPPAROLI [458] (1914) n'eurent pas davantage de succès avec la betterave à sucre cultivée en pleine terre.

H. VAGELER [459] (1916) avec l'avoine, le lupin, la fève, cultivés en milieu liquide additionné de sulfate de manganèse à la dose de 0 g. 482 par litre, n'obtint aucun résultat positif. Il en fut de même dans des expériences en pots sur sable et dans des essais en plein champ.

GRANVIGNE [460] (1923) s'il n'a constaté aucune action caractéristique des sels de manganèse sur diverses plantes a essayé d'expliquer son insuccès. Il a fait remarquer, en effet, que le sol sur lequel il opérait contenait 0 g. 450 de Mn soluble par kilogramme, teneur particulièrement élevée.

H. J. HUGUES et J. H. RICHES [461] (1932) observent encore que 30-60 kg. de sulfate de manganèse n'ont pas augmenté la récolte du blé.

P. BOISCHOT et J. HERVIAUX [289] (1940) expérimentant avec la pomme de terre variété Industrie, cultivée sur parcelle recevant, avec une fumure de base, une dose correspondant à 30 kg. de sulfate de manganèse à l'hectare, n'observent aucune influence nette de ce métal sur la récolte (Indices de comparaison : témoin 100, avec  $\text{SO}_4\text{Mn}$  99,5). Par contre, dans des essais effectués en 1941 [289 a] exactement dans les mêmes conditions, mais sur blé Vilmorin 27, ces auteurs obtiennent avec le manganèse un rendement plus élevé en grain (témoin 100, avec  $\text{SO}_4\text{Mn}$  114).

## CUIVRE

S'il est aujourd'hui démontré que le cuivre à très petite dose est utile au développement de végétaux inférieurs tels que certaines Algues (N. ONO [462] (1900); M. ROBERG [463] (1932)) ou des Champignons comme les Levures (C. A. ELVEHJEM [464] (1930); J. S. Mc HARGUE et R. K. CALFEE [465] (1931)) et surtout l'*Aspergillus niger* dont il accroît, non seulement les récoltes, mais accélère aussi la formation et la pigmentation des conidies (M. JAVILLIER [466] (1914-1939); H. BORTELS [467] (1927); M. ROBERG [468] (1928); O. METZ [469] (1930); L. K. WOLFF et A. EMMERIE [470] (1930); R. A. STEINBERG [471] (1935); F. YOSHIMURA [472] (1936); E. G. MULDER [24] (1938)<sup>1</sup>), les observations concernant l'influence du métal sur la végétation des plantes supérieures sont encore bien contradictoires. Ces observations ont cependant été particulièrement nombreuses. Ed. GAIN, en 1918, note que l'étude de cette influence ne comporte pas moins de 1.500 mémoires [502] et depuis cette époque, les travaux sur la question se sont encore multipliés.

Th. DE SAUSSURE [327 a], il y a près de cent cinquante ans, avait

1. Cet auteur a utilisé la relation existant entre la couleur des spores de l'*Aspergillus* et la concentration en cuivre du milieu pour déterminer au moyen de cette moisissure la richesse en cuivre des sols.

constaté que des plantes de *Polygonum persicaria* n'avaient pu vivre pendant plus de deux ou trois jours dans une dissolution de sulfate de cuivre (12 grains de sel, soit 637 mg. dans 40 onces, soit 793 cm<sup>3</sup> d'eau distillée) alors qu'elles avaient végété pendant cinq semaines en y développant leurs racines dans des dissolutions de « muriate » de potasse, de « muriate » de soude, de nitrate de chaux, ayant la même concentration en sel.

En 1821, PHILIPPS [503] rapporte « qu'ayant répandu accidentellement de l'oxyde de cuivre et des dissolutions de ce métal près des racines d'un jeune peuplier, cet arbre parut en peu de temps fort languissant. Les feuilles des branches inférieures se séchèrent les premières et le mal se communiqua bientôt aux feuilles plus élevées ». Mais les recherches sur les plantes supérieures ont surtout pris de l'ampleur à partir de 1885, époque où pour enrayer le mildiou de la vigne dont les ravages devenaient considérables, A. MILLARDET et U. GAYON [473] préconisèrent l'emploi du sulfate de cuivre et plus spécialement d'une mixture à base de ce sel et de chaux, dite « bouillie bordelaise ». Elles devaient suivre presque parallèlement les nombreux essais effectués avec le métal en phytopharmacie. Plus peut-être, en effet, avec le cuivre qu'avec d'autres oligo-éléments, la particularité de ce métal d'exercer un effet nuisible sur les cryptogames et les phanérogames, au-dessus de certaines limites de concentration, devait être utilisée dans la pratique. C'est ainsi que le cuivre a été employé avec succès non seulement dans la lutte contre le mildiou, mais aussi dans celle contre le « Black-rot » (P. VIALA [474] (1893)) et le « Peronospora » de la vigne (A. MILLARDET et U. GAYON [473 a] (1887)), le « Phytophthora infestans » de la pomme de terre (A. GIRARD [475] (1892), E. LAURENT [476] (1902), E. PARISOT [477] (1904), etc...). Dès 1807, Benedict PRÉVOST [478] constatait l'action toxique du métal sur la carie des céréales, du blé notamment, et préconisait le trempage préliminaire des semences dans une solution très diluée de sulfate de cuivre, traitement qui a été précisé ces dernières années par M. BIROLAUD [479] (1929), G. ARNAUD et M. GAUDINEAU [480] (1929-1931) car il se montrait souvent préjudiciable à la germination ainsi qu'au développement ultérieur du végétal (A. JUNGELSON [492] (1917); P. BAILLY [493] (1924); M. JAGUENAUD [494] (1929); W. H. EVANS [495]). D'autres espèces réagissent d'ailleurs de façon tout à fait contraire (D. SILBERT [496] (1923); A. DENSCH et T. HUNNIUS [497] (1924)). Outre ses propriétés fongicides étudiées particulièrement par R. THIÉLÉ [481] (1898), E. CHUARD [482] (1900), F. C. STEWART, H. J. EUSTACE et F. A. SIRRINE [483] (1903), L. RAVAZ et A. BONNET [484] (1903), R. EWERT [485] (1912), A. CADORÉ [486] (1918), S. CASTANA [487] (1919), J. D. WILSON et H. A. RUNNELS [488] (1935), H. WHETZEL, F. M. BLODGETT et E. O. MADER [489] (1936) et par bien d'autres encore, le cuivre par son effet caustique souvent constaté sur les tissus végétaux possède un pouvoir herbicide (C. DUSSE [490] (1900); O. BUTLER et R. BISSEY [491] (1934)) fréquemment utilisé pour la destruction des plantes adventices.

S'il était nécessaire de rappeler ces interventions du cuivre dans la pratique agricole ou viticole, vu les limites de ce mémoire elles ne peuvent être précisées davantage et, comme pour les autres oligo-éléments considérés, seuls seront mentionnés les travaux les plus importants se rapportant directement à l'action du métal sur le développement des végétaux en général, travaux dont beaucoup, ainsi qu'il a été dit plus haut, sont en relation avec ces interventions de caractère phytopharmaceutique. C'est ainsi, par exemple, qu'Aimé GIRARD s'est demandé si l'accumulation dans le sol des composés du cuivre utilisés pour combattre les maladies des plantes n'avait pas, en fin de compte, une action toxique sur la vie même de ces plantes. Etudiant pendant trois ans [504] (1892-1895) l'influence sur différentes cultures (blé, avoine, trèfle, pomme de terre, betterave à sucre) d'un apport considérable de sulfate de cuivre : 1.500 kg. par hectare, l'auteur n'a constaté aucun effet nuisible de ce sel sur la quantité et aussi la qualité des récoltes.

F. PORCHET et E. CHUARD relatent en 1904 [505] des expériences entreprises à la Station viticole de Lausanne depuis 1886, sur les effets sur la végétation de la vigne des composés du cuivre utilisés comme fongicides.

Ils constatent que le traitement avec des solutions de sels de cuivre a favorisé la croissance de la plante et accéléré la maturité du raisin, mais observent une action corrosive du sulfate de cuivre sur les jeunes racines. Déterminant à l'automne la quantité de métal ayant pénétré dans les tissus des plantes, les auteurs trouvent 0 g. 0133 de ce dernier pour 100 g. de matière sèche dans les lots ayant reçu une solution à 1 p. 100 de sulfate de cuivre et seulement quelques traces de l'élément dans les lots traités avec une solution à 0,01 p. 100 du sel.

S. A. BEACH et L. L. VAN SLYKE [498] (1892) à peu près à la même époque, cultivant en pots des pois, des tomates, du blé, sur des sols contenant 2 et 5 p. 100 de sulfate de cuivre, remarquent comparativement aux témoins que si le cuivre favorise la germination (la même constatation, contrairement aux observations de certains auteurs (voir ci-dessus), sera faite plus tard sur d'autres espèces par J. EFFRONT [499] (1905), U. VARVARO [400] (1912), Y. M. POLESHCHUK et S. NEGOVELOV [500] (1936), M. TOKUOKA et M. HITOSHI [501] (1937)), les plantes ayant reçu ce métal ne sont guère vigoureuses et leur système racinaire est peu développé.

A. TSCHIRCH [506] (1894) observe que si des sels de cuivre, tels que les sulfate, chlorure, nitrate sont corrosifs pour les végétaux, la croissance de ces derniers dans un sol contenant des composés insolubles est seulement un peu retardée. Des solutions nutritives renfermant 2 g. d'oxyde de cuivre pour 3 litres de liquide ne montrent pas de toxicité apparente pour *Phaseolus multiflorus*, cultivé dans ces milieux fréquemment aérés.

STGLISH [507] (1903), appliquant le sulfate de cuivre sur le sol aux doses de 40, 80 et 160 g. par mètre carré de surface, ne trouve pas ces dernières toxiques pour les arbres fruitiers et les fraisiers. Cependant les pommes de terre et haricots paraissent plus sensibles.

J. SIMON [508] (1909), d'expériences en pots, avec avoine et moutarde, sur sol de jardin, sur argile et sur sable pur, contenant des quantités de sulfate de cuivre variant de 0,01 à 10 p. 100, conclut que l'avoine supporte mieux le métal que la moutarde et que la toxicité de ce dernier se manifeste davantage dans le sable pur que dans le sol de jardin.

J. A. VOELCKER, dans des expériences en vases exécutées à la Station de Woburn [509] (1913-14), étudie l'influence de divers sels de cuivre sur la végétation du blé et remarque que cette influence dépend en grande partie de la fertilité du sol, la toxicité semblant, en effet, moins forte dans les sols les plus fertiles. D'autre part, l'auteur observe de notables différences de toxicité, selon la nature des sels cupriques employés et les quantités ajoutées. C'est ainsi que le sulfate de cuivre exerce une action nuisible à des doses correspondant à 0,05 p. 100 ou davantage de cuivre; mais à des doses correspondant à 0,02 p. 100 ou moins, il peut produire un léger effet favorable. Le phosphate de cuivre a généralement un effet utile et peut être employé en quantités fournissant jusqu'à 0,10 p. 100 de cuivre sans être toxique pour la plante. Le carbonate de cuivre est presque aussi nuisible que le sulfate si on l'emploie en quantités se rapprochant de celles qui fournissent 0,10 p. 100 de cuivre; son action est douteuse à la dose correspondant à 0,05 p. 100; elle est favorable à la dose de 0,02 p. 100 ou moins de cuivre. Le nitrate de cuivre à des quantités fournissant 0,02 p. 100 de métal est nettement nuisible, mais il devient utile lorsqu'il est employé en quantités plus petites. L'arsénite de cuivre est très toxique, même lorsque la quantité fournie ne correspond qu'à 0,05 p. 100 de métal.

J. A. VOELCKER a observé aussi l'influence du cuivre sur le développement des racines. Avec 0,05 p. 100 à l'état de sulfate, elles sont bien plus petites que celles des témoins, mais avec 0,02 p. 100 leur aspect change nettement, leur développement augmente et avec 0,01 p. 100 elles sont à peu près identiques à celles des lots ne recevant pas de cuivre.

H. VON FEILITZEN [510] (1917) effectuant des expériences de culture sur terre de bruyère, avec le pois, applique le cuivre comme « désinfectant » et reconnaît que celui-ci n'a pas d'effet toxique; il augmente même la récolte. M. MIÈGE [511] (1917) utilise également le métal pour la « désinfection du sol » et observe, au champ, en terrain argilo-siliceux, que le

sulfate de cuivre élève très sensiblement le rendement des pommes de terre.

W. H. HARRISON et P. A. SUBRAHMANYA AYYAR [512] (1917) exécutant des cultures en pots avec le riz constatent un accroissement de récolte du fait de l'introduction de petites quantités de sulfate de cuivre dans l'eau d'arrosage. Sur la même plante, M. TOKUOKA et M. HIROSHI [513] observeront plus tard (1937), une action nuisible du cuivre lorsqu'il sera ajouté à la dose de 50 p. p. m. de l'engrais donné, mais cette action deviendra utile lorsque la quantité introduite sera de 20 p. p. m. Dans ce dernier cas la récolte du grain augmentera, mais celle de la paille au contraire diminuera. Ces auteurs remarqueront, en outre, que le pH de l'eau d'irrigation ne variera pas quand la quantité de Cu sera plus petite que 100 p. p. m.

R. H. FORBES [514] (1917) a examiné les effets sur le développement des plantes de la diffusion du cuivre dans les eaux et les sols au voisinage des mines de Clifton-Morenci dans l'Arizona. Ayant cultivé des plantes dans une de ces eaux et sur un de ces sols contenant du cuivre, il a observé dans ces expériences faites en vases une action favorable du cuivre sur la végétation et il pense que la même action peut s'exercer aussi en plein champ. D'après cet auteur, les conditions s'opposant à la toxicité du cuivre seraient la présence de ce métal sous la forme de chrysocolle et de chalcosine, l'absorption par contact avec un sol divisé en fines particules, la réaction avec les carbonates, silicates et matières organiques tendant à précipiter Cu de ses solutions, la présence dans le sol de certains sels solubles jouant le rôle d'antitoxiques, la résistance à l'absorption opposée par les vieilles racines. Les conditions favorables à la toxicité des composés du cuivre seraient la présence de l'anhydride carbonique et de certains sels solubles favorisant la formation de solutions de cuivre arrivant en contact avec les racines des plantes, la texture grossière des sols sableux permettant la libre circulation de ces solutions dont le cuivre ne peut s'éliminer par adsorption, la présence de cuivre sous la forme la plus soluble de carbonate précipité.

E. TRUOG et J. SYKORA [515] (1917) dans des cultures de blé en pots, effectuées sur des sols artificiels, ont trouvé de leur côté que la toxicité du sulfate de cuivre était légèrement atténuée quand la surface des particules de ces sols artificiels était augmentée par l'addition soit de poudre de quartz, soit de kaolin. L'effet bienfaisant de ces deux substances était cependant très faible en comparaison de celui produit par le carbonate de calcium, qui neutralisait complètement l'action nuisible du sulfate et aussi du nitrate de cuivre.

Ce rôle du calcium à l'égard du cuivre a été particulièrement mis en lumière par L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, qui, après avoir effectué d'importants travaux sur la présence de ce dernier métal dans le sol (voir p. 78) et sa distribution dans les plantes [516] (1920), ont montré que si le calcium, même en excès, ne s'opposait pas à l'absorption du cuivre par les racines des végétaux, ni à sa diffusion dans leurs organes aériens, il permettait à ce dernier de se répandre dans un plus grand volume et par suite l'empêchait de s'accumuler localement en proportion dangereuse [516 a]. (1920). Il ne s'agissait pas là, à vrai dire, d'une action antitoxique du calcium vis-à-vis du cuivre, car l'inverse avait également lieu, le cuivre amoindissant les effets du calcium à ce point qu'il apparaissait encore plus vénéneux en présence de ce dernier que dans l'eau pure. Des expériences antérieures de ces auteurs [516 b] (1918) sur le pois ont montré par exemple, que le sulfate de cuivre à la dose de 1/40 de mg. par graine restait sans effet sensible dans l'eau pure, alors qu'il diminuait d'un tiers la longueur des racines en présence de 1/20 mg. de sulfate de calcium.

Cet antagonisme se manifeste aussi tout particulièrement avec le fer. Des cultures de blé, de pois, de laitue, effectuées par L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, en milieu liquide contenant une forte proportion de fer à l'état ferreux, ce qui rendait ce milieu peu favorable, condition de réussite de l'expérience, ont montré par rapport aux témoins qu'une addition de cuivre à la solution, à la dose de 8 milliardièmes de métal pour la laitue, à une dose dix fois plus forte pour les pois et le blé, modifiait complètement

l'aspect des cultures, surtout en ce qui concerne les racines qui en présence de Cu s'allongeaient deux à trois fois plus vite que celles des témoins.

Cette influence favorable du cuivre en présence des sels ferreux toxiques, malgré son apparence paradoxale, est certaine. Elle est d'ordre catalytique, puisqu'elle se manifeste à des doses infinitésimales et elle s'explique, ainsi que l'ont montré les auteurs, par le fait que le cuivre accélère l'oxydation du fer au minimum de la solution nutritive, le portant rapidement à l'état ferrique, forme sous laquelle il est insoluble ou colloïdal, c'est-à-dire inoffensif. Cette accélération qui s'accroît d'ailleurs quand la température s'élève, bien entendu jusqu'à une certaine limite dépendant de la solubilité de l'oxygène dans l'eau, conduit L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY à considérer le cuivre comme une véritable diastase minérale, qui ne diffère des diastases naturelles qu'en ce qu'elle agit en l'absence de toute matière organique et n'est pas détruite par l'ébullition. Le manganèse, dont les propriétés oxydantes ont été si bien mises en lumière par G. BERTRAND, reste cependant sans action dans les conditions où les auteurs se sont placés [516 c) (1920).

Ces importants travaux de L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, comme un certain nombre d'autres, dont il sera question plus loin, ont été effectués au laboratoire, avec des milieux nutritifs artificiels, le plus généralement liquides, et plus, peut-être, pour le cuivre que pour d'autres oligo-éléments, il faut se garder des généralisations. En effet, dans les expériences de culture en solutions aqueuses, le cuivre se montre le plus souvent extraordinairement toxique. H. COUPIN, en 1898 [517], faisant végéter de récentes germinations de plantes de blé dans des liqueurs contenant différentes quantités de nombreux sels de cuivre, trouvait, par exemple, que 0,0055 de sulfate, 0,0057 d'acétate, 0,0061 de nitrate de cuivre p. 100 étaient suffisants pour détruire les plantes. M. KANDA [518] (1904) a fait des constatations analogues sur le pois avec le premier de ces sels. De même W. E. BRENCHEY [519] (1910) avec l'orge : 1 p. de sulfate de cuivre dans 10.000.000 d'eau n'a pas exercé d'action favorable sur la plante.

H. VAGELER [459] (1916), effectuant des cultures dans l'eau avec avoine, lupin et haricot, observe qu'une dose de 0 g. 042 de sulfate de cuivre par litre a été nettement toxique (plus d'ailleurs pour le haricot que pour l'avoine), mais que cette toxicité a disparu par l'addition de chlorures de sodium et de calcium.

J. S. CALDWELL [520] (1914) avait trouvé aussi que dans un milieu nutritif contenant un sel de cuivre, le chlorure de sodium diminuait, sans cependant l'annuler, la nocivité de celui-ci.

Cet effet toxique du cuivre peut s'expliquer selon H. DEVAUX [521] (1901) par l'extrême facilité avec laquelle le métal est absorbé par les cellules végétales et notamment par celles des racines. De jeunes plantes sont capables, ainsi que l'a montré cet auteur, de prendre du cuivre même à la dose de quelques milliardièmes et par conséquent de l'accumuler si le volume de la solution est considérable.

Les expériences effectuées avec le cuivre par la méthode des cultures dans l'eau n'ont cependant pas toujours donné des résultats négatifs.

C'est ainsi que C. B. LIPMAN et G. MACKINNEY [522] (1931) qui, dans des conditions identiques, ont cultivé du lin dans des solutions contenant 0,125 p. p. m. de Cu sous forme de sulfate et dans d'autres ne recevant pas de métal, ont constaté que dans les deux séries les plantes se développaient également jusqu'à la floraison. A partir de ce moment, cependant, les fleurs étaient plus rares dans la série sans cuivre et ultérieurement il n'y avait aucune production de graines ou capsules dans cette même série. Il en a été de même dans des essais effectués avec l'orge. Cette plante ne portait aucune graine lorsqu'il n'y avait pas une très petite quantité de cuivre dans le milieu.

A. L. SOMMER [523] (1931) a effectué également des cultures en milieu aqueux avec le lin, le tournesol, la tomate. Dans ces expériences, les plantes ont eu un développement normal dans des solutions contenant une quantité aussi petite que 0 mg. 06 de cuivre par litre, alors qu'elles ont eu

un développement extrêmement limité et ont même péri dans des solutions ne contenant pas de cuivre. En ce qui concerne la tomate, la plus forte culture avec cuivre a produit 142 g. 2 de matière fraîche, alors que le poids de la plus forte culture sans cuivre n'a été que de 12 g. 8. Des résultats du même ordre ont été trouvés avec le tournesol et le lin.

Les expériences de K. SCHARRER et W. SCHROPP [524] (1933) furent assez contradictoires. Ces auteurs, réalisant des cultures de blé, riz, orge, avoine, maïs, pois sur milieux aqueux et sableux additionnés de sulfate de cuivre aux doses de  $10^{-9}$  à  $10^{-1}$  milliéquivalents, observèrent que la récolte du blé était partout moindre que dans le témoin. Il en était de même avec le riz, sauf avec les doses  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$ . La récolte d'orge a été, par contre, à peu près identique ou a même dépassé celle des témoins, avec toutes les quantités jusqu'à  $10^{-1}$ . Les résultats pour l'avoine ont été variables. Le développement du maïs a été notablement favorisé jusqu'à  $10^{-1}$  et celui des pois jusqu'à  $10^{-2}$ . Les doses de 1 et 10 milliéquivalents ont été aussi essayées, mais elles se sont montrées nuisibles pour toutes les espèces. Les auteurs ont également remarqué que le nitrate de calcium exerçait une action antagoniste à la toxicité du cuivre.

Si M. TOKUOKA et M. HITOSHI observent dans une expérience [129] (1937) que Cu à la dose de 0, 01 p. p. m. diminue la récolte du radis cultivé en solution nutritive, les mêmes auteurs, dans un autre essai en milieu aqueux trouvent que *Phaseoleus nanus* a eu sa croissance améliorée par une quantité de cuivre inférieure à 0,01 p. p. m.

Th. ARND et W. HOFFMANN [525] (1937) remarquent encore que le sulfate de cuivre fourni à de l'avoine cultivée dans l'eau et sur sable améliore la croissance et la santé de la plante, augmente la récolte, mais élève aussi le cuivre contenu dans le grain et dans la paille.

Si P. DEHÉRAIN et E. DEMOUSSY [526] (1901) ont constaté que l'eau distillée dans un alambic en cuivre était impropre à la germination, par contre C. OLSEN, au laboratoire de Carlsberg [527] (1939) a observé que des plantes comme *Hordeum distichum*, *Sinapis alba* et *Dianthus barbatus* croissant sur des solutions nutritives dont l'eau distillée provenait de récipients en cuivre étamé (eau contenant 0 mg. 6 de Cu par litre), se portaient mieux et produisaient plus de matière sèche que des plantes croissant en solutions, dont l'eau avait été gardée dans des récipients en verre<sup>1</sup>. Ces trois variétés de plantes citées ci-dessus contenaient d'ailleurs deux fois plus de cuivre que les plantes-témoins. D'autre part, le même auteur a remarqué que des plants de maïs dont l'eau de la solution nutritive contenait 1 mg. Cu par litre (sous la forme de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) se montraient plus résistants que ceux n'ayant reçu aucune addition de Cu.

D'une façon générale, on l'a vu par les expériences déjà anciennes citées précédemment, les sels de cuivre n'ont pas dans le sol la toxicité souvent constatée dans les cultures en milieu liquide, et cela du fait que l'ion Cu est fixé par le complexe absorbant.

Dans ses essais assez récents réalisés en pots, R. S. YOUNG [39] (1935), incorporant le sulfate de cuivre à la dose de 0,008 p. 100 des engrais ajoutés, observe un effet favorable du sel sur l'avoine. Par contre, G. JORET et H. MALTERRE [529] (1936), expérimentant au champ avec la même plante variété « Aigle de Svalof » sur un limon blanc recevant en plus de la fumure minérale normale 100 kg. de sulfate de cuivre à l'hectare, ne trouvent aucune modification dans les rendements en grain et en paille. Le poids de l'hectolitre a cependant légèrement augmenté et est passé de 37,5 à 38,8. Ces auteurs ont appliqué la même dose sur un limon de Santerre [529 a] (1938)

---

1. L'eau distillée dans un appareil en verre ou ayant été seulement en contact avec ce dernier peut, de ce fait, contenir une certaine quantité de matières minérales, naturellement très faible et variable avec la nature du verre, ainsi qu'avec les traitements qu'il a antérieurement subis, mais rarement négligeable dans les expériences de culture où la plante se montre d'une sensibilité infiniment supérieure à celle des meilleurs réactifs chimiques (L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY [528] (1921)).

et ont observé avec le blé « hybride 80 » un excédent de récolte de 2,6 p. 100. Le poids de l'hectolitre a été porté par le cuivre de 74,6 à 75,3.

M. F. MORGAN et O. E. STREET [530] (1938) ne remarquent dans les sols de Connecticut aucun effet utile du cuivre sur le tabac. Il peut même être toxique pour les plantes s'il est utilisé à une dose supérieure à 60 kg. de  $\text{SO}_4\text{Cu}$  par hectare.

Dans les expériences de P. BOISCHOT et J. HERVIAUX faites en 1940 [289] sur pomme de terre, variété Industrie, le sulfate de cuivre à la dose de 7 kg. 500 à l'hectare a produit un effet légèrement dépressif, mais de l'ordre des erreurs d'expérience. Par contre, dans celles réalisées en 1941 [289 a] sur blé Vilmorin 27 la même dose de sel a augmenté le rendement en grain de 10 p. 100.

Dans les sols humifères, le cuivre apparaît presque toujours utile. C. MEIJER [531] (1934), J. R. PILAND et L. G. WILLIS [532] (1937) ont tout particulièrement montré la relation qui existe entre l'effet heureux du cuivre et la quantité de matière organique présente dans le sol ou ajoutée à ce dernier. Selon ces derniers auteurs, le métal agirait comme catalyseur de l'oxydation des sols organiques. M. F. HILL et D. C. BRYAN [533] (1937) qui, sur les sols de Floride, ont observé avec la moutarde une action favorable du cuivre aux doses de 0,1 à 5 p. m. de terre (en Cu) ne sont pas cependant de cet avis et attribuent ces résultats favorables à un effet nutritif proprement dit, plutôt qu'à des actions d'oxydation catalytique ou de désinfection.

O. C. BRYAN, seul [534] (1929) avait déjà antérieurement obtenu des résultats positifs sur la gesse, les haricots, le sorgho cultivés en pots contenant des sols tourbeux d'Everglades (Floride) recevant un apport de sulfate de cuivre correspondant à 60 kg. par hectare. R. RUSSEL et T. F. MANNS [535] (1933), expérimentant avec la méthode de NEUBAUER, appliquent le sulfate de cuivre aux doses de 25-200 p. p. m. d'un sol constitué par un compost de sassafras et observent qu'avec ce sel la récolte de blé augmente de 33 à 45 p. 100 après vingt-six jours et celle de maïs de 5 à 12 p. 100 après vingt et un jours, comparativement aux témoins. M. D. BAKHULIN, en Russie [536] (1934), trouve que le cuivre ajouté à un sol très tourbeux a augmenté la récolte du lin, mais son action sur l'avoine n'a pu être nettement constatée. A. V. ZENYUK [537] (1937), en Russie, également, ajoute en 1930-32  $\text{SO}_4\text{Cu}$ , en quantité de l'ordre de 25-30 kg. par hectare, à un sol marécageux et remarque un effet heureux sur le blé, l'orge, le lin et l'avoine. L'année suivante, il effectue des essais avec les nitrate, chlorure, acétate, carbonate et oxyde de cuivre et observe dans tous les cas des augmentations de récolte, d'autant plus notables d'ailleurs que les sols marécageux utilisés étaient plus riches en phosphore.

F. GIESECKE et W. LESCH [538] (1936) ont expérimenté sur la moutarde, plante considérée comme particulièrement sensible à Cu. Celle-ci, cultivée en vases, sur un sol tourbeux acide recevant une application d'une chaux cuprifère (contenant 0,6 p. 100 de cuivre) s'est nettement mieux développée que sur le même sol recevant seulement de la chaux ordinaire.

F. STEEBJERG, dans des essais récents [539] (1940) effectués sur orge et avoine cultivés en vases contenant un sol riche en humus, a étudié l'action du cuivre introduit sous forme de débris cuprifères finement broyés, oxydes ou sulfures de Cu, malachite. Il a observé que 500 mg. de Cu sous forme de sulfure ou oxyde ont un effet plus favorable que 250 mg. de Cu sous forme de sulfate.

Dans les sols de landes tourbeuses où l'influence du cuivre est si manifeste, le métal est introduit depuis quelques années pour combattre une maladie qui s'y déclare souvent et qui provoque, chez les Céréales et les Légumineuses tout particulièrement, une sorte de chlorose. Cette maladie dite « du défrichement » parce qu'elle s'est développée surtout dans les terrains récemment défrichés de Hollande, du Danemark, d'Allemagne, de Suède, d'Amérique du Nord, d'Afrique du Sud ou d'Australie, appelée encore « maladie de réclamation » a été pendant longtemps attribuée à des microorganismes ou à des substances toxiques. Il est bien établi aujour-

d'hui que la carence du sol en cuivre assimilable est la seule cause du mal qui disparaît par l'application audit sol de sulfate de cuivre (J. HUDIG, C. MEYER et J. GOODIJK [540] (1926-27) ; B. RADEMACHER [541] (1934-37) ; E. BRANDENBURG [542] (1934-35) ; F. VIESCHLAG [543] (1935) ; S. UNDENAS [544] (1937) ; E. G. MULDER [24], D. S. RICEMAN et C. M. DONALD [545], C. S. PIPER [546] (1938) ; W. HOFFMANN [547], W. NICOLAISEN, W. SEELBACH et B. LEITZKE [548] (1939)) ou de scories cuprifères qui, à égalité de Cu, se montrent aussi efficaces que ce sel (W. NICOLAISEN [549], F. NIESCHLAG et H. WESTERHOFF [550] (1941)).

Le sulfate de cuivre est également utilisé avec succès pour lutter contre certaines maladies atteignant les arbres fruitiers, et qui, d'après quelques auteurs, pourraient être aussi dues à une déficience en cuivre. C'est le cas notamment du « Dieback » ou « Exanthème » des pommiers (T. C. DUNNE [551] (1938)), des poiriers (J. OSERKOWSKY et H. E. THOMAS [552] (1933)), des pruniers, des oliviers (R. E. SMITH et H. E. THOMAS [553] (1928)) ; V. CAHILL [554] (1929)), des *Citrus* (B. F. FLODY [555] (1917) ; F. C. Mc CLEERY [556] (1929), B. R. FUDGE [557] (1933-36) ; A. R. C. HAAS et H. J. QUAYLE [558] (1935) ; H. A. PITTMANN [559] (1936)) caractérisé par une coloration vert très foncé du feuillage et des fissures dans l'écorce avec production de gomme. Le sulfate de cuivre peut encore intervenir avec efficacité contre le « Frenching » ou chlorose des *Citrus* (O. S. ORTH, G. C. WICKWIRE et W. E. BURGE [560] (1934), du tabac (E. L. SPENCER [561] (1935), la chlorose du pècher (W. E. ISAAC [562] (1934)) et autres arbres fruitiers (F. G. ANDERSEN [563] (1932), celle aussi se manifestant parfois sur la betterave sucrière, dont les feuilles prennent un aspect marbré, les nervures apparaissant en vert et se détachant sur le tissu foliaire jaunâtre, les racines latérales devenant blanches tout en étant plus longues et plus minces que celles des betteraves intactes (D. A. VAN SCHREVEN [424] (1936)).

Cette relation entre l'action du cuivre et la production de la chlorophylle a souvent attiré l'attention des chercheurs. Elle a retenu celle de H. L. BOLLEY [564] (1908) qui trouve effectivement plus de chlorophylle dans les plantes traitées avec le sulfate de cuivre, de A. DENSCH et T. HUNNIUS [565] (1924) qui confirment le fait et, constatant que l'assimilation du fer par le végétal est déprimée par le cuivre, émettent l'idée que ce dernier métal pourrait remplacer le fer dans la formation du pigment. H. F. BERGMAN et W. E. TRURAN [566] (1936) remarquent aussi que des feuilles d'airelle traitées deux fois avec de la bouillie bordelaise renferment environ 15 p. 100 de plus, en poids, de chlorophylle que les feuilles non traitées. U. SARATA [567] (1937) trouve que les feuilles vertes extérieures du chou de Pe-tsai contiennent plus de cuivre que les feuilles blanches intérieures.

L. MONTEMARTINI a particulièrement étudié les effets de solutions très diluées de sulfate de cuivre (de 0,005 à 0,05 p. 100) sur le développement, la respiration et la photosynthèse de la vigne, du lupin, des haricots et des pommes de terre [411] (1911). Il a observé à la fois un effet favorable du métal sur le développement de toutes les plantes considérées et une action excitante tant sur la respiration que sur l'assimilation chlorophyllienne, mais cette action plus accentuée d'ailleurs sur ce dernier phénomène, était variable avec les différentes plantes. Etudiant de nouveau la question quelques années plus tard, le même auteur [568] (1920) s'est demandé si le sulfate de cuivre pouvait exercer la même action lorsqu'il était répandu sur la face externe des feuilles, les pulvérisations anticyptogamiques à base de sels de cuivre donnant presque toujours à la végétation une vigueur que l'absence de parasites ne peut tout à fait expliquer. Expérimentant sur la glycine, dont les feuilles sont très sensibles à l'action du sulfate de cuivre, L. MONTEMARTINI concluait d'après les résultats obtenus que ce sel épandu sous forme de solution diluée sur la face extérieure des feuilles exerçait sur elles la même action bienfaisante constatée antérieurement, c'est-à-dire l'excitation du phénomène de l'assimilation chlorophyllienne provoquant la formation d'une plus grande quantité de matière organique, mais aussi, d'autre part, l'excitation des phénomènes de la

circulation : passage des substances organiques du limbe foliaire dans la tige, circulation des substances minérales. L. MONTEMARTINI observait encore [569] (1927) que le sulfate de cuivre en solution à 0,08 p. 1.000 accélérât l'allongement de l'axe hypocotyle des plantules de tournesol géant de Russie, ce fait pouvant s'expliquer d'après l'auteur par une action du sel de cuivre sur la mobilisation et l'utilisation des réserves contenues dans la semence et sur leur circulation dans les plantules. D'après H. von WITSCH [570] (1936), la réaction géotropique des racines des plantules serait aussi influencée par les sels de cuivre qui détruiraient la composante positive du géotropisme.

## ZINC

Nombre de travaux concernant l'influence du zinc sur le développement des plantes supérieures ont eu pour origine des préoccupations d'ordre essentiellement pratique, notamment les dégâts parfois observés sur la végétation au voisinage des usines traitant les minerais de ce métal (H. LUNDEGARDH [571] (1927) ; P. DOPTER [572] (1929)) ou l'effet toxique produit sur les cultures expérimentales par le zinc servant à la fabrication des récipients souvent utilisés pour lesdites cultures (P. EHRENBURG [573] (1910) ; K. GEDROIZ [574] (1914) ; S. D. CONNER [575] (1920) ; W. F. CROSIER, S. R. PATRICK et M. T. MUNN [576] (1937)). Ces dernières années de multiples essais ont été effectués en relation avec l'emploi efficace du zinc dans la lutte entreprise aux Etats-Unis contre certaines maladies présentant notamment des caractères de chlorose : « Little-Leaf » ou « Rosette » des pommiers et autres arbres fruitiers des vallées de Yakima et de Wenatchee (W. CHANDLER, D. R. HOAGLAND et P. L. HIBBARD [577] (1932-36) ; A. H. FINCH [578], A. O. ALBEN, J. R. COLE et R. D. LEWIS [579], E. L. OVERHOLSER, L. L. CLAYPOOL et F. L. OVERLEY [580] (1932) ; J. B. DEMAREE, E. D. FOWLER et H. L. CRANE [581] (1933) ; W. S. BALLARD et R. C. LINDLER [582], I. DE V. MALHERBE [583], O. T. MC WHORTER [584] (1934) ; G. H. BLACKMON [585] (1935-36))<sup>1</sup>, « Mottle-Leaf » ou « Frenching » des *Citrus* de Floride et de Californie (J. C. JOHNSTON [587] (1933) ; A. F. CAMP [588], J. DUFRÉNOY et H. S. REED [589] (1934) ; E. R. PARKER [590] (1934-38) ; H. S. REED et E. R. PARKER [591] (1936-37) ; I. MATHEWS [592] (1935) ; H. C. POWELL et I. MATHEWS [593], J. R. NELLER et B. E. ROBERTSON [594] (1936) ; H. D. CHAPMAN, A. P. VANSELOW et G. F. LIEBIG [595] (1937)), « white bud » des céréales (R. M. BARNETT, J. P. CAMP et J. D. WARNER [596] (1934-36)), « bronzing » des aleurites (H. MOWRY et A. F. CAMP [597] (1933-34))<sup>2</sup> ; en France contre le « court-noué » de la vigne (J. DUFRÉNOY [599] (1935)).

Les travaux montrant l'influence très favorable du zinc sur la croissance ou l'activité physiologique de certains végétaux inférieurs et plus particulièrement de l'*Aspergillus niger*, dus à J. RAULIN [20 c] (1870), A. RICHTER [600] (1901), travaux d'abord contestés, mais ensuite nettement confirmés par ceux de M. JAVILLIER principalement [601, 601 a] (1907-14), M. LATHAM [602] (1909), J. BUROMSKY [603] (1911), H. J. WATER-

(1) D'après A. O. ALBEN et H. M. BOGGS [586] (1936), la Rosette du « Pecan » sévit davantage sur les arbres se développant sur les sols basiques qui ont une teneur en zinc bien plus élevée que celle des sols acides, ce qui semble prouver que dans les premiers le métal est sous une forme non assimilable par ces arbres. Dans les sols n'ayant que des horizons acides, une faible teneur en zinc suffit à empêcher l'apparition de la maladie. Pour le traitement de celle-ci par les sels de zinc, il faudrait donc tenir compte, d'après les auteurs, d'une part de la teneur en Zn du sol, d'autre part de la réaction de ce dernier.

2. D'après A. G. PLAKIDAS [598] (1937), le « bronzing » est dû à une déficience en zinc du sol.

MAN [604] (1913), R. A. STEINBERG [605, 471] (1919-1935), M. ROBERG [606] (1931), G. LOHMANN [607] (1934), K. PIRSCHLE [608] (1934), O. KAUFFMANN-COSLA et R. BRULL [609] (1937), ceux effectués sur *Rhizopus nigricans* par S. G. WAKSMAN et J. W. FOSTER [610] (1938) ont aussi provoqué des expériences sur les plantes supérieures.

Les premiers essais paraissent dus à KNOP [611] (1860) qui conclut de son travail, assez imparfait d'ailleurs, « que l'action toxique du zinc sur les plantes peut être considérée comme sûrement démontrée ». REICHARDT [612] (1867), réalisant fortuitement une expérience très grossière, constata « qu'une livre d'une solution sirupeuse de chlorure de zinc versée à la fois sur un gros pied de laurier-rose et sur un pied d'*Agapanthus* fit mourir les parties directement atteintes de cette dernière plante, mais celles-ci seulement ; le *Nerium oleander* perdit beaucoup de feuilles, mais en même temps parurent de jeunes pousses d'un vert clair ». M. FREITAG [613] (1868) n'observa sur la germination des graines et la croissance des plantes aucune influence digne de remarque des sels de zinc en solution diluée.

F. STORP [614] (1883) arrosant des jeunes chênes cultivés en pots avec des solutions de sulfate de zinc à 0 g. 1, 0 g. 2, 0 g. 4 p. 1.000 n'a trouvé aucune différence entre les plantes après un an et demi de ce traitement. Par contre, des pins soumis au même régime ont donné des pousses extrêmement courtes avec des aiguilles d'une teinte jaune pâle. De l'orge, du ray-grass, des boutures de saule ont péri en peu de jours dans des vases de culture recevant du sulfate de zinc. L'auteur fait une observation qui devait être confirmée il y a une douzaine d'années par M. GRACANIN (voir plus loin), à savoir que la toxicité du zinc était en relation avec les variations de l'intensité lumineuse. Si le sulfate de zinc ne se montre pas nuisible à l'obscurité, il se comporte comme un violent poison en pleine lumière.

Entre temps, KÖNIG [615] (1881) et KRAUCH [616] (1882) avaient aussi constaté une action nocive du sulfate de zinc sur les plantes, le premier de ces auteurs en incorporant le sel à un sol, le second en effectuant des cultures en solutions nutritives additionnées de doses diverses de zinc (25, 50, 100, 200 mg. de métal p. 1.000 ont fait périr des plants d'orge en cinq semaines).

F. NOBBE, P. BOESLER et H. WILL [259] (1884), étudiant comparativement la toxicité de l'arsenic, du plomb et du zinc sur des pois, estiment le zinc plus nuisible que le plomb pour ces derniers, la nocivité se manifestant par la diminution du poids des récoltes, la moindre largeur et le flétrissement des feuilles.

A. BAUMANN, en 1885 [617], conclut de nombreux essais effectués en milieu liquide sur diverses espèces végétales notamment sur sarrasin, radis, spergule, chou, betterave, trèfle, pin, sapin, vesce, orge, que toutes les plantes, sauf le radis, se sont développées en présence de 1 mg. de zinc par litre et que l'action toxique qui se révèle par le virage du vert des feuilles au jaune commence à se produire entre 1 et 5 mg. Zn par litre. La résistance à cette action a d'ailleurs varié avec les espèces. BAUMANN a exécuté aussi des expériences en pots avec des plantes fourragères cultivées sur des sols variés arrosés avec des solutions de sulfate de zinc ou additionnés de carbonate de zinc. S'il établit que ce dernier sel ne cause pas grand dommage du fait de son insolubilité relative (il peut se dissoudre dans l'anhydride carbonique présent dans le sol), l'auteur constate que le sulfate de zinc à une même dose est plus ou moins toxique suivant la nature du terrain et cela en raison de son adsorption plus ou moins notable par les divers constituants de ce dernier.

E. HASELHOFF et F. GOSSEL [618] (1904) ont examiné les effets de l'oxyde de zinc et du sulfate de zinc sur le blé, au moyen d'expériences en pots faites avec un limon sableux auquel était incorporée une petite quantité de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  pour suppléer à l'insuffisance de celui-ci. D'après ces auteurs, l'addition au sol d'une dose aussi élevée que 0,235 p. 100 d'oxyde de zinc a été sans effet sur les plantes. La chaux présente n'a pas modifié l'action de cet oxyde et il n'y a pas eu augmentation du métal dans la récolte. Quant au sulfate de zinc ajouté au sol à la même dose, il s'est

montré très toxique sur le blé et cette toxicité n'a pas été diminuée par une forte application de chaux.

Par contre, M. KANDA [518] (1904), arrosant des gesses trois fois par semaine avec une solution de sulfate de zinc à 0,28 p. 100, a observé un meilleur développement de ces plantes.

M. JAVILLIER [601 b] (1908) a étudié l'action du zinc sur les plantes d'une manière très précise. Il a cultivé du blé en solutions nutritives complètes, au moyen d'un dispositif expérimental assurant la stérilité de ces dernières et il a déterminé les variations de poids de la matière sèche obtenue. Avec des dilutions de zinc, introduit à l'état de sulfate, s'étalant entre 1/5.000.000 et 1/16.000, l'auteur a trouvé des résultats assez discordants. Si le métal, à une concentration de 1/5.000.000 et jusqu'à une dose qui ne doit pas dépasser 1/50.000, a dans une série d'essais exercé une action favorable sur le développement du blé, dans une autre série exécutée dans des conditions identiques son influence a été nuisible.

Opérant dans les conditions de la grande culture, le même savant [619] (1912), appliquant le sulfate de zinc aux doses de 1 à 10 kg. par hectare, a observé un effet utile de ce sel sur le maïs.

J. A. VOELCKER [620] (1912) conclut d'expériences en pots poursuivies sur le blé, pendant trois années, que les sels de zinc ajoutés ont été toxiques à une dose supérieure à 0,02 p. 100, mais par contre à une dose inférieure, ils ont exercé une légère action favorable, d'autant plus sensible avec les sels les plus solubles et en particulier avec le nitrate.

K. GEDROIZ [574] (1914) a effectué aussi pendant une période de trois ans des essais en vases avec les sels de zinc, essais qui ont montré que le sulfate et le chlorure de zinc agissaient sur la moutarde d'une manière à peu près identique, mais que la végétation de cette plante était arrêtée avec 0 g. 02 de Zn par pot de 5 kg. de terre, alors que celle de l'orge avait encore lieu avec la même dose. En très petite quantité (0 g. 0005 par pot) le métal favorisait le développement de la moutarde, mais avait un effet dépressif sur l'orge.

W. E. BRENCHEY [87] (1914), expérimentant en milieu aqueux avec le pois et l'orge, a trouvé que le sulfate de zinc, à une forte concentration, était très toxique pour ces deux plantes et il n'a constaté aucun effet utile de ce sel, même offert à la grande dilution de 1/200.000.000.

Dans son étude de l'influence respective des éléments d'une solution minérale sur le développement du maïs, P. MAZÉ [34] (1914) a été conduit à vérifier la tolérance de cette plante à l'égard des composés minéraux solubles du zinc. Dans ce but il a prélevé des plantules développées à l'abri des microbes dans l'eau distillée et les a introduites dans des flacons de 2 litres de capacité, renfermant des solutions de nitrate de zinc (sel choisi en raison d'une meilleure utilisation de l'acide nitrique que des autres acides minéraux) à des concentrations variant de 1/10.000 à 1/200.000, les dites solutions étant stérilisées préalablement. Les résultats de ces expériences ont montré l'action nocive du nitrate de zinc, jusqu'à la concentration de 1/160.000 ; cette action se révélait surtout par l'aspect des racines, les organes aériens ne présentant que très peu de différence avec ceux des plantes végétant dans l'eau distillée pure. En deçà de cette limite de dilution l'influence nuisible du sel considéré a augmenté rapidement ; c'est ainsi que la dose de 1/40.000 de nitrate de zinc a empêché le développement des racines et entraîné en moins d'un mois la mort des plantules. Ces faits montrent que le zinc, lorsqu'il est maintenu en solution, est très toxique pour le maïs à la concentration adoptée par MAZÉ pour son milieu nutritif complet [621] (1913), mais si son influence nuisible ne se fait pas sentir sur le développement de la plante, c'est parce que le carbonate de calcium présent dans le milieu l'insolubilise et le rend inoffensif. Le zinc étant cependant indispensable d'après d'autres expériences de MAZÉ, dont il va être maintenant question, la plante, selon cet auteur, absorbe le métal rendu insoluble avec le concours des excréments de ses racines, réglant exactement son absorption selon la consommation faite et évitant ainsi l'introduction dans la sève d'un élément devenant toxique

dès qu'il s'y accumule. Le zinc est indispensable à un milieu nutritif, d'après MAZÉ, et si la plante en est privée, elle meurt en quelques jours après l'apparition des premiers troubles de la végétation. Lorsque la dose de métal fournie, bien que relativement élevée, permet néanmoins à la plante de se développer, celle-ci se défend contre l'intoxication lente qui se manifeste généralement par la formation de corps sulfurés en abondance, ce qui fait dire à MAZÉ que l'action physiologique du zinc, aliment de la cellule, paraît liée aux migrations du soufre.

Après ces expériences déjà nombreuses et importantes, d'autres auteurs ont encore poursuivi cette étude de l'influence du zinc sur les plantes vertes, et ont confirmé le plus souvent les résultats précédemment obtenus.

C'est ainsi que A. L. SOMMER et C. P. LIPMAN [120] (1926) concluent de leurs essais réalisés sur milieu artificiel avec fèves, sarrasin, lin, moutarde, ricin, coton et orge que le zinc est indispensable à la vie et à la croissance des végétaux.

Le premier de ces auteurs [622] (1928), expérimentant seul, un peu plus tard, sur des légumes se développant en solution, trouve notamment que des haricots n'ayant pas reçu de zinc ont un poids sec moitié moindre que celui atteint normalement.

K. SCHARRE et W. SCHROPP [623] (1934) ont étudié l'action du sulfate de zinc à des doses de  $10^{-10}$  à 10 milliéquival. Zn pour 1 litre de solution nutritive de Richter, sur le développement du blé, de l'avoine, de l'orge, du riz, du maïs et du pois. Les cultures effectuées avec la solution nutritive seule ou sur du sable imprégné de cette dernière ont montré que Zn avait un effet favorable à la dose  $10^{-8}$  milliéquival. pour le maïs,  $10^{-7}$  pour le blé et le pois,  $10^{-6}$  pour le riz et l'orge. La dose de  $10^{-5}$  arrêtait le développement de l'avoine. Les récoltes ont diminué graduellement avec de plus fortes concentrations. Si 1 milliéquival. Zn a exercé une action toxique apparente, avec 10 milliéquival. les auteurs ont néanmoins encore obtenu de très faibles récoltes.

R. S. YOUNG [39] (1935), cultivant de l'avoine en pots, sur limon argileux et sur limon sableux, a trouvé que cette plante avait nettement bénéficié surtout sur le premier sol d'un apport de 0 mg. 5 de zinc (à l'état de sulfate) par kilogramme de terre. 0 mg. 1 du métal par kilogramme avait eu un effet particulièrement favorable sur la fléole, en limon sableux.

E. O. GALL [624] (1936), dans des essais effectués également en pots sur sol sableux, avec le maïs et la gesse, a appliqué le sulfate de zinc en quantités massives. Une dose de 0 g. 2 de Zn par kilogramme a été nettement toxique pour la gesse, mais le maïs n'a pas été affecté et cela jusqu'à une concentration de 0 g. 3 pour ce dernier. La toxicité de ces fortes doses a été très réduite par l'addition au sol, soit de carbonate de calcium soit de phosphate monocalcique.

B. N. SINGH et S. PRASAD [387] (1936), expérimentant avec le chlorure de zinc, ont trouvé que du blé, en culture aqueuse, avait été favorisé par l'addition au milieu de 0,0001-0,0005 M du sel. A des concentrations plus élevées, celui-ci s'était montré nuisible.

Toujours dans des expériences en milieu aqueux, mais celles-ci effectuées avec le radis, M. TOKUOKA et M. HITOSHI [129] (1937) ont obtenu une augmentation de récolte avec des doses de Zn inférieures à 0,1 p. p. m.

Avec la pomme de terre cultivée en solution nutritive, D. V. VAN SCHREVEN [625] (1937) a observé dans les vases sans zinc un retard du développement avec une apparence rappelant les premiers symptômes de la maladie de l'enroulement. Des taches irrégulières se sont ensuite produites sur les feuilles dont la couleur est passée au brun-verdâtre. A l'emplacement de ces taches le tissu foliaire a peu à peu disparu et une dégénérescence des tissus voisins s'est manifestée. La série avec zinc a donné une récolte très supérieure à celle sans zinc. Sur la betterave à sucre, cultivée de façon identique, le même auteur n'a constaté que peu de différence dans le développement du feuillage durant le premier mois, mais peu à peu aussi apparues, dans la série sans zinc, des taches irrégulières qui se sont déve-

loppées de plus en plus et ont fini dans les cas les plus graves par s'étendre sur la surface entière du limbe foliaire. Le développement du pivot a été également affecté. A la récolte, les plantes avec zinc ont produit deux fois plus de sucre que celles sans zinc (voir plus loin « Oligo-éléments et qualité des récoltes »), et la teneur en matière sèche des feuilles et de la racine était également plus élevée dans la série pourvue en ce métal.

A. H. MARION [626] (1937), à la Station expérimentale de New-Jersey, a étudié l'influence du zinc sur des rosiers se développant dans du sable humecté avec une solution nutritive, à laquelle il ajoutait respectivement 0, 1, 10 et 50 p. p. m. de l'oligo-élément. Après deux semaines, cet auteur a remarqué un noircissement des racines des plantes ayant reçu 50 p. p. m., suivi bientôt de la mort de ces dernières. Après un mois, les lots ayant reçu 10 p. p. m. ont eu aussi leurs racines noires ; après deux mois les parties aériennes étaient endommagées. Les plantes recevant 1 p. p. m. ont atteint une forte taille, mais cette amélioration n'a duré que quatre mois ; au bout de ce temps, les racines ont commencé à noircir.

P. BOISCHOT et J. HERVIAUX [289] (1940), expérimentant au champ sur pomme de terre, variété Industrie, ont obtenu une très légère augmentation de la récolte avec une dose de sulfate de zinc correspondant à 7 kg. 5 par hectare, mais cette augmentation (ind. de comp. 100,2 pour témoin 100) était de l'ordre des erreurs d'expérience. La même dose de sel a donné en 1941 [289 a] avec le blé Vilmorin 27 un excédent de rendement tant en grain (24 p. 100), qu'en paille (3 p. 100).

Les travaux qui viennent d'être résumés se rapportent le plus généralement, on a pu le remarquer, à l'influence du zinc sur la croissance de la plante (et c'est d'ailleurs l'objet essentiel de cette revue), cette croissance étant constatée soit par le poids de la récolte, soit par des caractères purement extérieurs. Il n'apparaît pas illogique de compléter cette énumération par une brève analyse de quelques recherches concernant le rôle du zinc sur l'activité strictement physiologique du végétal.

C'est ainsi qu'en 1909, B. SILBERBERG [627] (1909) a trouvé que le sulfate de zinc favorisait la respiration des tissus de réserve de la betterave, de la pomme de terre, du salsifis, quand ce sel était employé en solution N/16. Une solution N/14 empêchait déjà cette respiration de la pomme de terre.

W. ZALESKI et A. REINHARD [628] (1909) ont observé que le dit sulfate de zinc en solution à 0,02 p. 100 augmentait l'énergie respiratoire des graines de lupin, maïs, pois, en germination.

M. GRACANIN [629] (1928) conclut de ses observations que le zinc joue vis-à-vis des plantes hétérotrophes un rôle physiologique tout à fait différent de celui qu'il joue vis-à-vis des plantes vertes autotrophes. Si, d'après cet auteur, il favorise chez les premières, et d'une façon typique, le processus vital, il est au contraire nuisible pour les plantes vertes supérieures. A de très faibles doses, cependant, il peut accélérer la germination des semences jusqu'au moment où les premières feuilles apparaissent et acquièrent la possibilité de synthèse chlorophyllienne. A partir de ce stade, le sulfate de zinc à la concentration de 0 mol. 001 a, dans les expériences de l'auteur, exercé une action nuisible sur *Lamium album* et *Glechoma hederacea*, action se traduisant par la mort rapide des plantes du fait d'un prompt dépérissement ou de la détérioration marquée du vert des feuilles. Sur *Mnium undulatum* et *Elodea canadensis*, GRACANIN a observé également une disparition de la chlorophylle par l'apport de faibles quantités de sulfate de zinc. Cette disparition était d'ailleurs en relation non seulement avec l'augmentation de la concentration en sel, mais aussi avec l'élévation de la température et l'accroissement de l'intensité lumineuse, comme dans les anciennes expériences de STORP (voir plus haut). *Mnium undulatum* avait encore, par exemple, une teneur élevée en chlorophylle à la lumière diffuse et à une température de 10° C. après dix jours, alors que la même plante recevant une quantité identique du même sel, mais exposée à une lumière solaire intense, était presque complètement dépourvue de pigment. Le zinc, en produisant une chlorose chez les plantes et

en exerçant ainsi une action contraire à celle du fer, jouerait donc un rôle de photocatalyseur négatif dans les cellules vertes. L'augmentation des récoltes obtenue par nombre d'auteurs, du fait d'un apport de zinc au sol, doit être attribuée, estime GRACANIN, à une influence exercée par cet élément sur l'activité microbiologique du sol plutôt que sur l'activité physiologique des plantes.

Cette conclusion trop catégorique, est-il utile de le dire, ne peut être admise sans réserves. Elle se trouve, en effet, en contradiction avec certains résultats analytiques, notamment ceux obtenus par G. BERTRAND et M. ANDREITCHEVA [630] (1933). Ces auteurs ont plusieurs fois dosé le zinc des feuilles vertes et celui des feuilles étiolées d'une même plante et ont toujours trouvé une plus grande proportion du métal dans les premières, ce qui laisse logiquement supposer que le zinc comme le manganèse d'ailleurs (G. BERTRAND et M<sup>me</sup> ROSENBLATT [417] (1932)) intervient, contrairement à l'opinion de GRACANIN, dans la production de la chlorophylle ou dans un processus en rapport.

Les déductions de ce dernier auteur sont également en contradiction avec les faits observés dans le traitement de certaines maladies des plantes présentant des caractères de chlorose et dont il a été parlé ci-dessus, chlorose en relation, le diagnostic semble bien établi, avec une carence en zinc. J. DUFRÉNOY et H. S. REED [589] (1934) ont montré, tout particulièrement, que ce métal fourni aux *Citrus* atteints de « mottle-leaf » augmentait la production de la chlorophylle et l'activité de la photo-synthèse.

Les sels de zinc étant utilisés aujourd'hui fréquemment aux Etats-Unis pour corriger la déficience du sol en cet élément, O. E. GALL et R. M. BARNETTE [631] (1940) ont recherché récemment à partir de quelles doses l'accumulation de Zn dans le sol devenait toxique pour les plantes. Ils ont trouvé que la teneur en Zn échangeable (fraction liée au complexe colloïdal du sol [632] (1936)) à partir de laquelle se manifestait la toxicité se situait entre les limites suivantes : pour le maïs et pour 100 g. de sol, de 0,688 à 1,376 m. éq. dans un sol sableux, de 0,758 à 1,137 m. éq. dans un limon sableux, de 1,615 à 2,153 m. éq. dans un limon argileux ; pour la gesse et pour 100 g. de sol de 0,275 à 4,82 m. éq. en sol sableux, de 0,379 à 0,758 m. éq. en limon sableux, de 0,538 à 1,077 m. éq. en limon argileux.

Antérieurement, H. LUNDEGARDH [571] (1927) avait eu une préoccupation un peu analogue, en ce qui concerne le comportement de la végétation au voisinage d'une usine de grillage de minerai de zinc. Il avait cultivé en pots, sous serre, *Poa annua* et de l'avoine sur divers sols prélevés aux abords de ladite usine, sols dont la teneur en zinc variait entre 0,017 et 0,035 p. 100 pour la couche superficielle et entre 0,007 et 0,04 p. 100 pour le sous-sol. Les expériences réalisées avec des sels minéraux constituant une fumure de base complète ont montré, à la fois un effet favorable des sels apportés et une action toxique du zinc, lorsque la teneur en celui-ci atteignait dans le sol 0,027 p. 100.

Des expériences de germination faites par le même auteur sur blé, avoine et trèfle dans une solution nutritive complète suivant la formule de BRENCHLEY avec des concentrations en sulfate de zinc variant entre N/300.000 et N/60.000 ont donné des résultats indiquant pour certains cas une faible action favorable sur le phénomène, dans d'autres un léger retard de celui-ci. L'avoine germait normalement dans une solution N/3.000 de sulfate de zinc. Lorsque les plantes étaient cultivées un certain temps en milieu aqueux, un effet de retard sur la végétation était observé avec une solution N/500.000.

## PLOMB

J. VOELCKER [620, 633] (1912-14) a particulièrement étudié l'action du plomb sur le développement des plantes. Effectuant, sur du blé cultivé en pots à la Station de Woburn, de nombreuses expériences avec des sels de plomb, ajoutés au sol sous forme de phosphate, carbonate,

nitrate, sulfate et chlorure, à la dose de 0,03 à 0,1 p. 100, il a constaté notamment que la germination était seulement retardée dans le cas du nitrate de plomb et des deux plus fortes doses de chlorure. Pendant toute la durée des essais, les plantes eurent une bonne végétation ; celles ayant reçu Pb à l'état de phosphate avaient le meilleur aspect. Aucune des cultures ne montra des signes d'intoxication et les résultats généraux obtenus ont fait penser à une action plutôt favorable que dépressive. Cette action favorable fut surtout évidente dans les séries où le plomb avait été incorporé sous forme de phosphate et de nitrate. Avec le carbonate et le sulfate, les résultats étaient très voisins de ceux obtenus avec les pots témoins ; avec le chlorure, la production de la paille a été un peu moindre. De nouvelles expériences en pots faites en 1922 et 1923 sur le blé par le même auteur [633 a] ont montré que le chlorure était très toxique à la dose de 0,5 p. 100.

U. VARVARO [400] (1912) a trouvé que l'oxyde de plomb accélérât la germination des graines de maïs.

A. STUTZER [634] (1913), employant dans des essais en plein champ, avec 50 kg. de  $P_2O_5$ , 80 kg. de  $K_2O$  et 45 kg. de N, 4 kg. de nitrate de plomb par hectare, attribue à ce dernier sel une action retardable sur le développement de la betterave à sucre (l'augmentation de rendement constatée a été de 398 kg. dans un cas et de 171 kg. dans un autre). Le même auteur, cultivant du maïs [634 a] (1914) dans des solutions nutritives contenant diverses doses de nitrate de plomb, trouve que la quantité optimum de sel pour obtenir un effet heureux est de l'ordre de 0 g. 5 par litre.

A. STUTZER [634 b] (1916) a effectué également des cultures sur milieu liquide avec le seigle, le blé, l'avoine, l'orge, le pois, qui ont donné lieu à des constatations identiques. Lorsque la dose dépassait 0 g. 5 de nitrate de plomb par litre, le développement des racines et des feuilles était retardé.

Expérimentant de nouveau au champ et mélangeant comme précédemment le nitrate de plomb avec les autres engrais employés, l'auteur a trouvé que les essais sur betterave à sucre fournissaient une augmentation de rendement en racines et en sucre imputable au nitrate de plomb ; par contre, les pommes de terre se montrèrent très sensibles à l'action de Pb qui fit diminuer les rendements en tubercules et en fécule.

Un essai sur blé, en terre sablo-argileuse, donna les résultats suivants :

|                                                                                 | RENDEMENT A L'HECTARE |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
|                                                                                 | Grain                 | Paille    |
| a) Fumure fondamentale sans azote sous forme de nitrate de soude. . . . .       | kg. 2.261             | kg. 3.858 |
| b) Fumure fondamentale + 20 kg. d'azote sous forme de nitrate de soude. . . . . | 2.661                 | 4.732     |
| c) Fumure b) + 4 kg. nitrate de plomb. . . . .                                  | 2.346                 | 4.061     |
| d) Fumure fondamentale + 30 kg. d'azote sous forme de nitrate de soude. . . . . | 2.861                 | 4.801     |
| e) Fumure d) + 4 kg. nitrate de plomb. . . . .                                  | 3.226                 | 5.541     |

L'auteur concluait de tous les essais effectués que le nitrate de plomb méritait de retenir l'attention et si dans le sol ce sel se transformait en sulfate et en carbonate difficilement solubles, l'extrême division de ces derniers (à l'état hydraté) maintenait l'efficacité de Pb.

J. STOKLASA [360, 635] (1911-13) a constaté aussi que le nitrate de plomb (qu'il a trouvé en petites quantités dans le nitrate de chaux de Norvège) augmentait la récolte des betteraves à sucre (de 30 à 40 p. 100) et le sucre contenu (de 1 p. 100), mais seulement lorsque ce sel était employé à la dose 0,9775 p. 100. Il commençait à exercer une action dépressive sur la récolte, mais non sur la teneur en sucre, lorsqu'il était utilisé à la dose de 1,855 p. 100. De petites quantités du même sel augmentaient la récolte de l'avoine et du sarrasin, le maximum d'effet étant produit par 2 kg. 7 de plomb métallique par hectare pour l'avoine et de 4 kg. 52 pour le sarrasin.

Par contre, K. J. GREISENEGGER [636] (1915) appliquant le nitrate de plomb à la dose de 10 à 40 kg. par hectare, s'il constatait de légères variations dans le rendement et la qualité des betteraves à sucre, ne les attribuait pas au sel de plomb ajouté.

J. J. GRIFFITH [637] (1919) signale que les légumes sont très sensibles à l'action du plomb qui s'avère nuisible, mais qu'avec le temps cet effet toxique disparaît peu à peu.

E. BONNET [638] (1922), dans une première série d'expériences effectuées en 1914, a fait plonger les racines d'un certain nombre de plantules (blé de Bordeaux, sarrasin, lupin, cresson alénois, radis, lentille, chou) dans des solutions titrées de sels de plomb (nitrate, acétate) et a constaté que les plantes soumises à une forte dose de sel (solution N/10) absorbaient le plomb qui se retrouvait intégralement dans les racines (il n'y en avait pas trace dans les tiges et les feuilles), ce qui confirmait les résultats obtenus par Jean DE RUFZ DE LAVISON [639] (1911). Les solutions N/10 d'acétate ou de nitrate de plomb se sont montrées toxiques pour toutes les plantes, sauf pour le blé qui a résisté vingt jours. Les sels de K, Ca, Mg n'ont pas agi comme antitoxiques. Plus la dilution du sel de Pb était grande, moins l'absorption de ce dernier était active. La transpiration avait beaucoup diminué dans les plantes soumises aux sels de plomb. Les solutions N/10 à N/50 des sels employés ont entravé également la germination des graines; seul le blé a été peu sensible.

De nouvelles expériences effectuées par le même auteur en 1921 ont confirmé les résultats précédemment obtenus et ont montré en outre que le sel de plomb arrêta la croissance de la tige, mais ralentissait seulement celle des racines; ces dernières étaient courtes, épaisses et pourvues de poils absorbants nombreux.

R. A. BERRY [640] (1924), étudiant au Collège d'Agriculture de Glasgow les propriétés fertilisantes du nitrate de plomb, estime que celui-ci peut être employé dans la pratique agricole en même quantité que le nitrate de soude. Comme ce dernier, il augmente le feuillage des plantes et accentue leur coloration verte. Selon cet auteur, l'usage d'une telle quantité ne donne aucune trace de plomb dans la plante et celui-ci ne peut être retrouvé dans l'extrait aqueux du sol. Sauf dans le cas de très fortes doses, le plomb est fixé par le sol et la toxicité du sel soluble détruite.

S. PRAT [641] (1928), opérant en milieu liquide, constate que *Vicia faba* s'est extrêmement peu développé dans une solution N/10.000 de  $PbCl^2$  et a absorbé tout le plomb de cette solution. Avec J. BABICKA et J. POLIVKOVA [642] (1932) le même auteur a observé une forte augmentation de la croissance de ladite plante et une moindre absorption de Pb lorsqu'on ajoutait dans la solution à 1/10.000 mol. de  $PbCl^2$ , 1/100 mol.  $CaCl^2$ .

Expérimentant également avec de jeunes plantes de *Vicia faba* et aussi de *Vicia sativa*, de *Lupinus albus*, de *Zea Mais*, d'*Helianthus annuus* et de *Pisum sativum* cultivées dans une solution nutritive L. MAROTTA constatera en 1936 [643] qu'une addition de plomb au milieu retarde le développement pendant les premiers jours, mais qu'après onze jours les racines de *Vicia sativa* ayant été en contact avec le métal seront plus longues que celles des témoins.

F. S. HAMMET [644] (1928) effectue des expériences du même ordre. Il fait germer sur de la mousse (*Sphagnum*) stérilisée, des graines de haricot, de maïs, notamment, et observe que l'ion plomb à une concentration de 1/100.000 à 1/50.000 retarde la croissance des racines des plantules. Avec le pois carré, soigneusement cultivé dans une solution nutritive bien équilibrée, le retard a augmenté suivant la concentration en plomb.

J. T. DUNN et H. C. L. BLOXAM [645] (1932), constatant en Angleterre le mauvais aspect des herbages voisins des fours à coke, considèrent que les quantités de plomb et aussi de cuivre éliminées par ces derniers sont suffisantes pour exercer une action néfaste sur les prairies voisines.

100 p. p. m. de Pb ajoutées au sol ont augmenté le développement de la fléole dans les expériences de R. S. YOUNG [39] (1935).

S. C. VANDECAVEYE, G. M. HORNER et C. M. KEATON [271] (1936) ont observé qu'un retard dans la croissance des plantes, sans effet toxique marqué, se manifestait lorsque les sols où elles se développaient recevaient plus de 50 p. 1.000 de nitrate de plomb.

K. SCHARRER et W. SCHROPP [646] (1936) effectuant des essais de culture sur sable et en milieu liquide ont trouvé que le maïs, moins sensible à l'action toxique de Pb que le blé, le seigle, l'orge et l'avoine, avait eu sa croissance légèrement favorisée par de petites doses de ce métal.

C. M. KEATON [647] (1937) remarque que la croissance de l'orge a été favorisée par l'addition de composés du plomb à des sols de la région de Washington (Yakima). Expérimentant sur la même plante avec le sulfate de plomb, C. B. LIPMAN et W. F. GERICKE [648] (1917) avaient vingt années auparavant observé à la fois une action dépressive et une action favorable. De leurs essais ces auteurs n'avaient pu tirer de conclusions définitives.

M. C. HOOPER [649] (1937), cultivant des Légumineuses en vases, soit sur sable, soit en milieu liquide, constate que l'effet toxique du sulfate de plomb est très faible, même quand on l'emploie en solution saturée à la concentration de 30 mg. par litre. Si les plantes sont traitées par pulvérisation, elles ne subissent un effet nocif que lorsque le sulfate de plomb arrive à boucher les stomates. Pour cet auteur, la présence d'un excès de plomb ne peut affecter sérieusement les plantes et c'est sans doute par une action indirecte que les minerais de plomb stérilisent le sol aux environs des mines.

## II

### EXPÉRIENCES PERSONNELLES

Après les multiples expériences qui viennent d'être relatées et qui concernent l'influence sur le développement des plantes des « oligo-éléments » qui ont retenu mon attention, expériences effectuées, on a pu s'en rendre compte, dans les conditions les plus diverses, une contribution supplémentaire à l'étude de cette question déjà tant examinée peut apparaître à beaucoup inutile. Cependant, ainsi que je l'ai dit précédemment, devant la difficulté qu'il y avait à dégager de cet amoncellement de travaux des conclusions particulièrement nettes, par suite des nombreuses contradictions relevées, j'ai pensé que de nouvelles expériences se rapportant au sujet pouvaient se justifier si toutefois elles étaient réalisées avec une méthode susceptible de donner des résultats incontestables, celle-ci impliquant nécessairement des conditions bien déterminées. C'est donc de la méthode utilisée dans mes recherches et des conditions que j'ai choisies pour ces dernières qu'il va d'abord être question dans cet exposé.

### MÉTHODE EXPÉRIMENTALE ADOPTÉE

Pour étudier l'action des « oligo-éléments » sur la production des récoltes, deux moyens d'investigation se présentaient, moyens utilisés l'un et l'autre par les chercheurs qui m'avaient précédé :

le champ d'expériences et les essais cultureux en pots. Le champ d'expériences où l'on opère dans les conditions de la pratique agricole semblait le procédé de recherche le plus logique puisque les plantes y sont cultivées dans leur milieu naturel et sont soumises à toutes les influences qui peuvent avoir leur répercussion sur les rendements. Bien que ce mode d'expérimentation ait atteint, grâce surtout à l'emploi des méthodes statistiques, un certain degré de précision, il n'en est pas moins vrai qu'il reste difficile à utiliser. Il suppose des moyens dont un chercheur isolé ne dispose généralement pas, mais même si ce dernier peut les posséder, il rencontre, en expérimentant en plein champ, certaines difficultés (si tout au moins il a le souci d'une grande exactitude). Celui qui opère en pleine terre est, en effet, à la merci de certaines perturbations atmosphériques, des ravages des insectes ou des rongeurs, du développement des mauvaises herbes et surtout de l'hétérogénéité possible du sol des diverses parcelles, malgré tout le soin apporté au choix du champ d'expériences. De plus, l'expérimentateur doit au moment de la récolte prendre les plus grandes précautions pour que celle-ci soit absolument intacte afin qu'elle puisse être appréciée avec rigueur.

Dans des essais avec les « oligo-éléments » où les variations de rendement par rapport à des témoins pouvaient ne pas être très considérables, les expériences en plein champ, même répétées plusieurs fois, ne me paraissaient pas susceptibles de donner des résultats suffisamment précis pour montrer la justesse ou l'inexactitude d'une « doctrine » à la fois physiologique et agronomique.

J'ai donc eu recours à la deuxième méthode d'étude qui s'offrait à moi : les expériences de culture en vases de végétation, avec naturellement un sol comme milieu.

Cette méthode permet d'exécuter tous les essais envisagés dans des conditions rigoureusement identiques, donc parfaitement comparables, même si celles-ci sont un peu artificielles comme c'est le cas. En vases, en effet, les plantes sont plus ou moins isolées ; l'environnement n'est pas le même que dans un champ et l'influence des plantes voisines sur l'accès de la lumière, le renouvellement de l'air, sa température, etc..., se manifeste d'une manière différente. De plus, le sous-sol n'intervient pas, ni par le volume qu'il offre au développement des racines ni par ses éléments nutritifs. La densité du faisceau racinaire n'est pas la même qu'en pleine terre. Le rapport entre le poids des racines et celui des parties aériennes est vraisemblablement différent. C'est d'ailleurs un fait d'observation courante que les plantes cultivées en pots ne prennent pas tout le développement qu'elles sont susceptibles d'acquérir en pleine terre. Mais un certain nombre d'avantages viennent compenser ces imperfections : 1° L'homogénéité du milieu ; une uniformité heureuse remplace toutes les inégalités naturelles du sol en place. Dans la culture en vases, le sol utilisé est parfaitement mélangé et ameubli, l'aération est maximum à condition toutefois que la terre soit bien choisie, la répartition des engrais ou des substances étu-

diées est aussi bonne que possible. 2° L'approvisionnement en eau est uniforme et maintenue à son degré optimum. Il ne se produit pas, en vase, ces alternatives de sécheresse et d'humidité qui agissent si profondément dans la nature sur la mobilisation des éléments nutritifs, spécialement de l'azote et du phosphore, sur la microflore du sol et sur la structure. 3° Dans tous les vases on a la même densité de plantes, c'est-à-dire un même nombre de pieds par unité de surface. 4° Les végétaux cultivés sont à l'abri des ravages des prédateurs et, peuvent être soustraits à certaines perturbations météorologiques parfois désastreuses.

Dans de telles conditions, les rendements obtenus avec les diverses substances dont on étudie l'action seront, il est facile de le prévoir, exceptionnellement favorables. On ne pourra naturellement les transporter dans la pratique agricole et les rapporter par exemple à l'hectare, mais ils indiqueront d'une façon nette et certaine *le sens des actions étudiées*. Si dans les essais en vases les différences dues à l'apport de tel ou tel élément peuvent se trouver amplifiées, l'expérience montre qu'il existe généralement un parallélisme assez étroit entre les résultats trouvés dans ces essais et ceux obtenus en plein champ pour ce qui touche notamment l'allure du développement de la plante, l'utilisation des éléments fertilisants, la formation des réserves, la composition des tissus (P. JOLIBOIS, H. BURGEVIN, G. GUYON et A. BOULLÉ [650], 1935).

La culture en vases ne constitue pas cependant une simple réplique de l'expérimentation en pleine terre ; elle possède des avantages qui lui sont bien propres. D'abord elle permet d'atteindre, avec un nombre suffisant de répétitions, une précision et une sensibilité généralement impossibles à obtenir ainsi que je l'ai dit plus haut, dans les essais en plein champ, tels qu'ils sont réalisés habituellement. Elle est, en outre, la seule méthode utilisable, lorsqu'on désire, comme cela a été le cas dans les recherches qui vont être exposées plus loin, établir de façon exacte des bilans et plus particulièrement des bilans d'azote, élément qui sous la forme nitrique est très soluble et, de ce fait, se déplace facilement dans le sol.

L'expérimentation en vases était donc le seul moyen d'étude susceptible de me fournir des garanties sérieuses pour mener à bien la tâche que je m'étais proposée. D'autre part, elle seule me donnait la possibilité, en multipliant les essais, d'avoir d'un seul coup et sans trop de difficultés matérielles une vue d'ensemble sur les modifications d'une récolte par l'apport des engrais catalytiques, ce qui était mon principal but.

On trouvera ci-après les détails se rapportant à l'emploi de cette méthode dans le présent travail. *Son application n'exclut pas bien entendu, dans ma pensée, l'utilité d'essais ultérieurs en plein champ où sera mesurée la portée pratique des conclusions déduites. Lesdites conclusions résultant de ces cultures en vases constitueront, au contraire, des bases solides pour des expériences en pleine terre.*

## CONDITIONS CHOISIES ET DÉTAILS TECHNIQUES

Afin que la méthode expérimentale adoptée et qui vient d'être exposée puisse fournir des résultats vraiment démonstratifs, il importait qu'elle fût utilisée dans des conditions particulièrement convenables à la bonne manifestation des actions étudiées. Cette dernière impliquait à la fois un « matériel » bien choisi, susceptible de réagir avec netteté, et quelque soin pour la mise en œuvre et le « fonctionnement » régulier de celui-ci.

C'est de ce « matériel » (sol, espèce végétale cultivée, oligo-éléments ajoutés), ainsi que du dispositif et des opérations nécessaires à sa « réaction » normale qu'il va être question maintenant.

*Choix du sol.* — Ainsi que je l'ai dit précédemment et comme je viens encore de le laisser entendre, il y avait intérêt dans l'étude que j'ai entreprise et dont le sujet, je le rappelle, a un caractère général : l'action exercée par les « oligo-éléments » à la fois sur les plantes et sur les phénomènes microbiens se réalisant dans le milieu naturel où elles se développent, le sol, il y avait intérêt, dis-je, à choisir ce dernier de telle sorte qu'il corresponde à un type réel et fréquent et aussi qu'il possède une constitution physique et une composition chimique satisfaisantes permettant une bonne appréciation de cette action. Il était donc utile d'opérer sur un sol « complet » ne réclamant pas un apport d'amendement (carbonate de calcium) ou d'engrais de base complémentaire (azoté, phosphaté, potassique) susceptible d'exercer des influences secondaires. Ce n'est pas dire qu'une terre à briques par exemple dépourvue de calcaire et de matière organique, ne constitue pas par les surfaces qu'elle occupe un type digne d'autant d'attention que celui dont j'ai fait choix, mais j'ai pensé qu'une semblable formation, malgré son importance pratique, s'écartait un peu trop au point de vue purement scientifique du milieu « sol » tel qu'on avait l'habitude de le concevoir. D'autre part, sur une pareille terre, les variations d'un phénomène, dont j'envisageais l'étude, la combustion de la matière organique, n'auraient guère été mesurables.

Sans doute, l'action des « oligo-éléments » sur ce sol et sur d'autres de constitution différente de celui choisi méritait d'être examinée attentivement (elle l'a été d'ailleurs d'une façon trop fragmentaire cependant, par un certain nombre d'auteurs, ainsi qu'on a pu s'en rendre compte dans la « revue des travaux antérieurs »), mais personnellement, vu l'ampleur prise par mes recherches dans le sens que j'ai indiqué en me limitant simplement à un seul type de sol, il m'apparaissait difficile, sinon impossible, isolément et avec les moyens dont je disposais, d'effectuer pareil examen.

J'ai donc choisi comme unique sol, pour les expériences qui vont être relatées, une terre prélevée dans le domaine de l'Ecole Nationale d'Horticulture de Versailles, ancien Potager du Roi. Ce

dernier, on le sait, établi par La Quintinie à un endroit marécageux, est constitué par un sol de remblai. La couche rapportée, d'une épaisseur d'environ 2 mètres, est un limon provenant de Trappes ; toujours cultivée depuis près de trois siècles, elle a été enrichie par des apports massifs et continus de fumier de l'ordre de 150.000 kg. environ par hectare et par an, mais n'a jamais reçu d'engrais chimiques. Cette terre que je connaissais bien pour l'avoir utilisée auparavant dans des expériences se rapportant à l'influence de divers facteurs sur la combustion de la matière organique des sols agricoles [651] (1934) me paraissait convenir pour mes nouvelles recherches, du fait de sa richesse en principes fertilisants essentiels qui rendait inutile l'addition d'une fumure de base. Les réactions secondaires dont j'ai parlé plus haut n'étaient pas à craindre. D'autre part, sa constitution physique indiquée plus loin correspondait à celle de cette terre « complète » avec laquelle je tenais à expérimenter. Enfin, vu sa teneur assez élevée en matières organiques, les phénomènes biochimiques que j'étudiais pouvaient s'y manifester de façon relativement intense et, le cas échéant, subir sous l'influence des « oligo-éléments » des variations pouvant être appréciées avec certitude.

Le 12 décembre 1938, par un froid très vif ( $-12^{\circ}$ ) j'ai prélevé, dans ledit domaine de l'Ecole Nationale d'Horticulture, 100 kg. environ de terre. Le sol étant gelé sur une épaisseur d'environ 15 cm., il a été nécessaire de briser d'abord avec la pioche cette couche superficielle extrêmement dure qui a été rejetée. A la profondeur de 15 cm. la terre qui avait une humidité de l'ordre de 18 p. 100 était très meuble et paraissait très homogène. Elle a été alors extraite avec une bêche sur une étendue d'environ 1 mq. et une épaisseur d'une quinzaine de centimètres. Enfermée immédiatement dans des sacs neufs, elle a été transportée à Paris au Laboratoire de Chimie agricole du Conservatoire National des Arts et Métiers. Les sacs y ont été alors vidés de leur contenu et celui-ci étalé, après mélange, sur une grande bache neuve a été abandonné, pendant une semaine, à la température du laboratoire ( $14^{\circ}$ ), à l'abri d'un apport extérieur ( $\text{NH}_3$ ). Au bout de ce temps, la terre qui avait été remuée fréquemment était grossièrement sèche. (Elle ne pouvait l'être complètement en raison de son « hygroscopicité » et de la tension de la vapeur d'eau extérieure.) Je l'ai de nouveau mélangée intimement et tamisée à travers un tamis à trous ronds de 2 mm. en écrasant légèrement, à la main, les petits agglomérats formés pendant la dessiccation. La proportion de terre fine s'élevait à 94,8 p. 100 de terre totale. Le résidu resté sur le tamis (5,2 p. 100) était composé de quelques silex et de petits morceaux de calcaire ; il ne renfermait pas de débris végétaux.

Après tamisage, la terre a été de nouveau homogénéisée, puis transportée dans une grande caisse en bois munie d'un couvercle où elle sera conservée. Sur cette réserve de terre fine ainsi constituée, j'ai prélevé immédiatement et avec beaucoup de soin un échantillon d'environ 5 kg. que j'ai enfermé dans un flacon en verre, bien bouché avec un bouchon de caoutchouc neuf. Des portions de cet échantillon seront utilisées pour le dosage de l'humidité, les analyses physique et chimique du sol « préparé » et certains essais préliminaires.

*Humidité.* — Trois déterminations effectuées selon la technique habituelle (dessiccation à l'étude à  $105^{\circ}$  jusqu'à poids constant) ont donné : 3,97, 3,99, 4,01 p. 100. Dans un but de simplification, j'ai admis une humidité de 4,0 p. 100 de terre humide.

*Analyse physique.* — Celle-ci a été exécutée par la méthode en usage

dans les Stations Agronomiques Françaises, méthode donnant une classification des éléments conforme aux conclusions adoptées par l'Association internationale de la Science du Sol. On en trouvera la description dans mon *Guide pour l'Etude expérimentale du Sol* [652] (1933).

Cette analyse physique a fourni les résultats suivants, rapportés à 100 de terre fine séchée à 105° :

|                                       |                      |      |                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------|----------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sable                                 | { grossier . . . . . | 12,5 | (résultat obtenu en multipliant par 1,72 (WAKSMAN) [653] le taux de carbone organique 4,5 p. 100 déterminé par combustion en présence d'oxygène). |
|                                       | { fin . . . . .      | 52,8 |                                                                                                                                                   |
| Limon . . .                           |                      | 11,8 |                                                                                                                                                   |
| Colloïdes                             | { argileux . . . . . | 12,6 |                                                                                                                                                   |
|                                       | { humiques . . . . . | 2,2  |                                                                                                                                                   |
| Calcaire                              | { fin . . . . .      | 0,6  |                                                                                                                                                   |
|                                       | { grossier . . . . . | 1,2  |                                                                                                                                                   |
| Matières organiques totales . . . . . |                      | 7,8  |                                                                                                                                                   |
|                                       |                      |      |                                                                                                                                                   |
|                                       |                      |      |                                                                                                                                                   |

Elle confirme le caractère de la terre de l'Ecole d'Horticulture indiqué ci-dessus : sol de limon profondément modifié par l'incorporation de matières organiques en quantités massives.

*Analyse chimique.* — En préambule à celle-ci, j'ai d'abord déterminé la réaction du sol expérimenté, par la méthode colorimétrique usuelle (agitation respective de 5 g. de sol dans 10 cm<sup>3</sup> d'eau distillée bouillie, avec 10 gouttes de chacun des indicateurs de H. A. LUBS et W. M. CLARKE [654] ; observation de la teinte prise par le liquide après clarification). Cette réaction de la terre utilisée correspondait à pH 6,9.

L'analyse chimique proprement dite de cette dernière a été effectuée au moyen des techniques décrites dans le *Guide* précité. Elle a comporté les dosages de l'azote organique et ammoniacal (selon KJELDAHL [652 a]) ; de l'azote nitrique (méthode de A. Th. SCHLÆSING [652 b]) ; de l'acide phosphorique [652 c] ; de la potasse [652 d] ; de la chaux [652 e] ; de la magnésie [652 f] dits assimilables, c'est-à-dire solubles dans l'acide nitrique dilué d'une concentration finale (après agitation avec le sol) comprise entre 0 g. 5 et 1 g. de N<sup>2</sup>O<sup>5</sup> par litre. En ce qui concerne P<sup>2</sup>O<sup>5</sup> cependant, vu la faible teneur du sol en calcaire, outre la méthode utilisant comme réactif solubilisant l'acide nitrique étendu (méthode A. Th. SCHLÆSING-A. DE SIGMOND) qui peut se montrer infidèle, ainsi que l'a fait remarquer G. BRIOUX [655], j'ai employé, selon la recommandation de cet auteur, celle faisant usage d'acide citrique à 2 p. 100 comme agent de dissolution.

Pour 100 de terre fine supposée sèche, j'ai trouvé :

|                                                                                                                       |        |                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|
| N organique et ammoniacal . . . . .                                                                                   | 0,455  | (0,547 par la méthode SCHLÆSING-DE SIGMOND) |
| N nitrique . . . . .                                                                                                  | 0,0123 |                                             |
| P <sup>2</sup> O <sup>5</sup> assimilable (sol. citrique) . . . . .                                                   | 0,525  |                                             |
| K <sup>2</sup> O assimilable . . . . .                                                                                | 0,154  |                                             |
| CaO assimilable (représentant approximativement CaO des carbonates + CaO échangeable du complexe absorbant) . . . . . | 2,404  |                                             |
| MgO assimilable . . . . .                                                                                             | 0,027  |                                             |

L'examen de ces chiffres montrait que ce sol possédait, ainsi qu'il convenait, une teneur élevée en principes fertilisants essentiels, dépassant très largement la limite de réaction aux engrais usuels<sup>1</sup>. Il renfermait, en parti-

1. Je rappelle que d'après A. DEMOLON [656] (1933) les terres de culture renfermant plus de 0,032 de P<sup>2</sup>O<sup>5</sup> (soluble dans l'acide citrique) p. 100 de terre fine n'ont pas besoin d'engrais phosphaté. D'après G. JORET [657] (1932) les engrais potassiques ne sont plus efficaces pour les cultures faites en sols de limon lorsque ces derniers contiennent plus de 0,045 p. 100 de K<sup>2</sup>O assimilable.

culier, une quantité considérable de  $P_2O_5$  assimilable. R. CHAMINADE et J. BOUCHER [658] (1939), à la Station de Recherches horticoles de Versailles, ont recherché récemment si dans un tel sol le déséquilibre des éléments fertilisants résultant de ce grand excès de  $P_2O_5$  ne pouvait pas être corrigé par un apport des autres substances essentielles, bien que ces dernières envisagées isolément soient présentes en quantité suffisante. D'après les expériences de ces auteurs, les fumures incorporées n'ont dans aucun cas augmenté le rendement et il n'y avait pas lieu de modifier la composition chimique du sol considéré.

Désirant connaître le mieux possible cette composition chimique de la terre de l'Ecole Nationale d'Horticulture, j'ai encore dosé dans celle-ci le fer total, le fer existant à l'état d'oxyde hydraté, le chlore, le soufre total et celui des sulfates préexistants.

J'ai fait usage pour ces déterminations des techniques indiquées dans mon ouvrage cité ci-dessus [652], et qui sont, notamment pour l'oxyde de fer libre, celle de A. DEMOLON [659 et 652 g] (j'ai fait également ce dosage, à titre comparatif, par la méthode de DROSDOF et E. TRUOG [660], simplifiée par C. BRIOUX et E. JOUIS [661]<sup>1)</sup> et pour le soufre, celle de G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN [663 et 652 h]. Elles m'ont fourni les résultats suivants, toujours p. 100 de terre fine, supposée sèche :

|     |                                               |                                                 |
|-----|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Fe  | total . . . . .                               | 1,275                                           |
|     | (existant à l'état d'oxyde hydraté) . . . . . | 0,651 (A. DEMOLON), 0,860 (DROSDOF et E. TRUOG) |
| Cl. | total . . . . .                               | 0,027                                           |
| S   | total . . . . .                               | 0,119                                           |
|     | des sulfates . . . . .                        | 0,032                                           |

[A titre documentaire, les quantités de fer total du sol (sol. dans les acides concentrés), extrêmement variables, ont oscillé dans des analyses de R. GUILLIN [664] (1919) entre 0,126 Fe p. 100 dans une terre sableuse de la Sologne et 4,057 de Fe p. 100 dans une terre de désaggrégation des roches éruptives de la Guadeloupe ; un limon des plateaux du Vexin contenait 1,323 de Fe p. 100. Dans les horizons supérieurs des profils d'un sol brun sur loess et d'un sol podzolique sur roche sableuse de Versailles, G. BARBIER [662] (1936) a trouvé respectivement 0,81 et 0,52 de Fe à l'état d'oxyde hydraté (méthode A. DEMOLON) ; C. BRIOUX et E. JOUIS [661] (1936) dans l'horizon A des profils de 4 limons des plateaux de la Seine-Inférieure ont trouvé des teneurs variant de 0,69 à 0,49 de Fe (méthode DROSDOF et E. TRUOG).

Si J. GUÉRILLOT [665] (1937) dans une terre de Grignon n'ayant reçu ni engrais ni fumier depuis trente-cinq ans, n'a dosé que 0,0026 de Cl p. 100, antérieurement P. PICHARD [666] (1899) avait trouvé dans divers sols des quantités variant de 0,028 à 0,070 de Cl p. 100. A. NEMEC [667] (1934) cite pour une terre le chiffre de 0,0069 p. 100, tandis que S. RAVIKOVITCH et N. BIDNER [668] (1937) dosent dans un sol de Palestine irrigué pendant neuf années de 0,022 à 0,73 p. 100 de Cl (à 30 cm. de profondeur), de 0,019 à 0,041 p. 100 (à 90-120 cm.), et dans un sol non irrigué adjacent de 0,006 à 0,007 p. 100 de Cl.

Dans une cinquantaine d'échantillons provenant de diverses régions de France, G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN [669] (1927) ont trouvé des quantités de soufre total variant de 0,020 (terre du Gard) à 0,517 (terre de l'Institut Pasteur) p. 100. Ce dernier sol contenait p. 100 0,111 de S à l'état de sulfates.]

DOSAGE DES OLIGO-ÉLÉMENTS ÉTUDIÉS. — Dans une étude de l'action des oligo-éléments sur le développement des plantes, il apparaissait utile d'avoir quelque idée sur la richesse en ces derniers du sol choisi pour les expériences. Mais en l'état actuel des techniques analytiques cette détermination n'a, aux points de vue physiologique et agronomique, qu'un intérêt extrêmement restreint puisque, sauf pour le manganèse existant en quantité relativement

1. Ces deux méthodes sont en effet controversées. Si pour G. BARBIER [662] la première, qui fait usage comme réactif d'attaque d'acide oxalique à 2 p. 100, donne une extraction plus complète, pour C. BRIOUX et E. JOUIS, la seconde, basée sur la sulfuration de l'oxyde de fer libre et dissolution de ce dernier dans HCl étendu, donne au contraire des résultats supérieurs. Mes chiffres confirment cette dernière observation.

importante, elle ne peut concerner que la *totalité* de chaque oligo-élément présent dans le sol sous une forme plus ou moins soluble) et non sa *partie facilement mobilisable*. Il eût été cependant bien désirable de connaître, avec certitude, par exemple, la teneur en bore, en cuivre, en zinc *assimilables* de la terre employée, tant pour incorporer au sol dans les essais projetés une quantité du catalyseur en rapport avec celle préexistante dans le milieu et susceptible d'être immédiatement utilisable par la plante, que pour examiner séparément le développement de cette dernière en fonction de cette fraction initialement assimilable de l'oligo-élément considéré. Mais, actuellement, je le répète, il ne semble pas qu'il y ait possibilité d'apprécier exactement cette partie dite « assimilable » qui, pour certains « oligo-éléments », est vraisemblablement de l'ordre de 1/10, de 1/100, peut-être même de 1/1.000 de mg. par kilogramme de terre. *Ultérieurement, dans d'autres expériences sur le rôle agronomique des bio-catalyseurs et lorsque les méthodes de dosage auront été encore perfectionnées, j'estime qu'il y aurait lieu d'envisager l'assimilabilité de ces derniers, tout comme est envisagée aujourd'hui celle du phosphore ou du potassium.*

J'ai donc dû me contenter de doser dans la terre de l'Ecole d'Horticulture la quantité *totale* de chaque oligo-élément examiné dans la présente étude et présumé existant dans cette terre, sauf pour le manganèse dont j'ai pu apprécier une fraction facilement soluble, fraction exerçant un rôle particulièrement important comme on a été à même de le constater dans la revue des travaux antérieurs, précédant cet exposé.

Bien que les résultats trouvés n'aient sans doute qu'un intérêt purement documentaire, leur obtention a demandé beaucoup de temps. Plusieurs mois m'ont été, en effet, nécessaires pour étudier, vérifier, comparer les différentes et souvent nombreuses méthodes de dosage préconisées et aussi pour contrôler la pureté des réactifs qu'elles exigeaient. Afin que l'effort accompli ne reste pas inutile, je vais donner quelques détails sur les techniques que j'ai adoptées et utilisées pour la détermination des oligo-éléments dans la terre de l'Ecole d'Horticulture.

*Bore.* — J'ai fait choix pour ce dosage de la méthode due à G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN [670]. Ces auteurs font d'ailleurs remarquer, avant d'exposer celle-ci, que : « Quelques chimistes ont tenté de déterminer la partie du bore soluble, soit dans l'eau pure, soit dans l'eau chargée de gaz carbonique ou additionnée d'acide chlorhydrique dans plusieurs échantillons de terre arable ; d'après les conditions dans lesquelles ils se sont placés, leurs résultats sont pour ainsi dire sans valeur. » Ce qui justifie l'opinion que j'ai exprimée ci-dessus sur la difficulté d'appréciation de la fraction de l'oligo-élément dénommée assimilable, c'est-à-dire facilement soluble dans un réactif convenablement choisi. Cette difficulté est d'autant plus grande, avec le bore, qu'il s'agit d'un élément existant généralement dans le sol en quantités particulièrement infimes.

La détermination du stock *total* de bore de la terre (comme d'ailleurs celle de certains autres oligo-éléments, ainsi qu'on le verra plus loin) est également une opération fort délicate en raison des combinaisons variées et parfois très résistantes aux réactifs dans lesquelles le métalloïde est engagé. Il est nécessaire de désagréger l'échantillon de terre, comme dans l'analyse générale des silicates, par fusion avec un alcali ou un carbonate alcalin. Voici brièvement résumée la technique que j'ai choisie :

Fusion en creuset de platine de 1 g. (au lieu de 0 g. 250, quantité indiquée par les auteurs de la méthode) de terre fine séchée à 100-105°, intimement mélangée avec six fois son poids de carbonate de potassium spécialement préparé au laboratoire par calcination en capsule de platine de bitartrate de potassium R. P. plusieurs fois recristallisé (utilisation d'eau distillée dans un appareil en métal) ; broyage du résidu au mortier d'agate et transvasement dans le petit ballon d'un appareil à distillation entièrement en verre « Kavalier » de Bohême, tel que celui décrit par H. AGULHON [680] ; distillation avec de l'alcool méthylique en présence d'acide sulfurique, particulièrement pur, jusqu'à extraction totale de Bo et suite du dosage selon la technique indiquée par cet auteur [686] très légèrement modifiée (récolte du distillat dans un récipient en platine contenant NaOH normale, évaporation à sec au B.-M., avec précaution, du liquide, reprise par 5 gouttes HCl pur et 0 cm<sup>3</sup> 5 eau distillée, transvasement dans petits tubes à essai gradués, immersion pendant vingt-quatre heures dans le liquide complété à 2 cm<sup>3</sup> avec eau de lavage d'une bande de papier de curcuma ; comparaison dans des conditions identiques de la coloration produite à celles obtenues dans un essai à blanc et avec des types spécialement préparés au moyen d'une solution-étalon de borate de sodium fondu, types correspondant à des quantités déterminées de bore,

trempage des diverses bandes dans solution d'ammoniaque au 1/10 et comparaison des nouvelles colorations obtenues).

**Fluor.** — Après examen des diverses méthodes préconisées, j'adopte pour le dosage de F dans la terre, la plus courante, celle de A. CARNOT [671]. Cette dernière a surtout été utilisée pour la détermination du métalloïde dans les phosphates naturels ; elle peut s'appliquer, d'après son auteur, même si ces phosphates contiennent une proportion sensible de matière organique. Il suffit, dans ce cas, de calciner très doucement pour détruire cette dernière sans perte de fluor. Je rappelle que cette méthode est basée sur ce fait que les fluorures sont décomposés par l'acide sulfurique en présence d'un excès de silice ; le gaz fluorure de silicium qui se dégage est entraîné dans une solution de fluorure de potassium ; le précipité de fluosilicate de potassium qui se forme ( $\text{SiF}_4 + 2 \text{KF} \rightarrow \text{K}_2\text{SiF}_6$ ) est recueilli et du poids de ce précipité on déduit la teneur en fluor.

Je n'insisterai pas sur les détails de cette méthode et le petit appareil qu'elle nécessite, ni sur les précautions à prendre. Ils se trouvent décrits dans les ouvrages classiques d'analyse minérale. Je ferai simplement observer que dans le cas de la terre, un apport de silice (susceptible d'apporter des traces de F) ne s'impose pas et d'autre part que l'opération visant à la formation du fluorure de silicium et à son dégagement doit être prolongée suffisamment longtemps (pendant plusieurs heures), afin de permettre la décomposition complète de tous les fluorures préexistants. Bien que la fin de la réaction soit indiquée par l'arrêt du dégagement gazeux au sein du liquide sulfurique, il est nécessaire de chauffer encore un certain temps celui-ci en activant un peu le courant d'air destiné à l'entraînement du fluorure de silicium formé.

Il y a lieu également de prendre quelques précautions au début de l'attaque, afin d'éviter le départ prématuré d'une petite quantité d'acide fluorhydrique libre (H. HERLEMONT et J. DELABRE [672]).

J'ai effectué ce dosage sur 50 g. de terre.

**Arsenic.** — J'ai dosé l'arsenic selon la technique utilisée aux Etats-Unis par C. S. SLATER, R. S. HOLMES et H. G. BYERS pour la détermination de cet élément dans les sols des stations d'études sur l'érosion [673].

25 g. de terre sont placés dans le ballon de 750 cm<sup>3</sup> d'un appareil à distillation de LEDEBURG, employé communément pour le dosage de l'arsenic dans les minerais. Au moyen de l'entonnoir à robinet de l'appareil, je fais tomber lentement sur cette terre 20 cm<sup>3</sup> d'acide sulfurique R. P. pour toxicologie, afin de décomposer les carbonates et de déshydrater partiellement le sol. A cette masse pâteuse refroidie, j'ajoute avec précaution un mélange constitué par 80 cm<sup>3</sup> d'acide bromhydrique (à 40°) et 1 cm<sup>3</sup> de brome particulièrement purs. Je distille ensuite lentement. Pendant cette opération qui est prolongée le plus possible, l'extrémité du réfrigérant de l'appareil plonge dans 5 cm<sup>3</sup> d'un mélange ac. bromhydr.-brome de même composition que ci-dessus. Le liquide obtenu, dont la densité est supérieure à 1,4, est complété à un volume connu avec de l'eau bi-distillée. Il contient l'arsenic. Après addition de 10 cm<sup>3</sup> d'acide nitrique R. P., je chauffe avec précaution pour détruire l'acide bromhydrique. Lorsque le dégagement de brome a cessé, j'évapore à sec. Le résidu est repris par 5 cm<sup>3</sup> d'eau bi-distillée. Je rends faiblement alcalin par addition de soude N/10, en présence de phénolphthaléine comme indicateur. Je transvase dans une fiole jaugée de 25 cm<sup>3</sup> et j'effectue le dosage de As par la méthode colorimétrique de E. TRUOG et A. H. MEYER [674] qui dérive, on le sait, de celle bien connue de DENIGÈS. Après addition des divers réactifs nécessaires (molybdate d'amm. en milieu sulfurique, chlorure d'étain) selon la technique indiquée par les auteurs, je complète à 25 cmc. avec de l'eau bi-distillée, j'abandonne pendant dix minutes et je compare la coloration bleue qui s'est développée à celle obtenue dans les mêmes conditions avec un témoin résultant d'un essai à blanc (celui-ci est d'ailleurs absolument négatif) et divers types constitués au moyen d'une solution-étalon d'arséniate de sodium plus ou moins diluée.

**Iode.** — J'ai essayé d'apprécier l'iode pouvant exister dans la terre de l'Ecole d'Horticulture par deux méthodes : 1° Celle de J. S. Mc HARGUE [675] ; 2° Celle de R. L. ANDREW [676].

1° Dosage selon J. S. Mc HARGUE. — Le procédé de cet auteur implique, comme celui publié antérieurement par R. V. NORRIS et D. A. RAMA RAO [677], la calcination de la terre à très haute température (au moins 850°) dans un tube de silice traversé par un courant d'oxygène. Les parties volatiles susceptibles de contenir de l'iode sont fixées dans une série de flacons laveurs contenant une solution de carbonate de potassium à 5 p. 100, série faisant directement suite au tube à combustion. Après cette dernière que j'ai prolongée pendant trois heures au rouge vif, je réunis les liquides absorbés et les évapore à sec dans une capsule de porcelaine. Le résidu est *calciné très doucement* pour détruire la trace de matière organique présente, puis humecté avec de l'alcool à 95° et broyé très finement dans un mortier de porcelaine. Placée

ensuite sur un filtre, la matière est lavée abondamment avec de l'alcool à 95°. Le filtrat est évaporé à sec, additionné de 1 cm<sup>3</sup> d'acide sulfurique R. P., puis de nouveau évaporé. Le résidu est ensuite dissous dans quelques centimètres cubes d'eau bi-distillée et le liquide obtenu filtré au-dessus d'un petit entonnoir à séparation dans lequel j'ajoute 1 cm<sup>3</sup> exactement mesuré de sulfure de carbone, 1 cm<sup>3</sup> d'acide sulfurique et 1 cm<sup>3</sup> d'une solution de nitrite de sodium à 10 p. 100, tous ces réactifs étant particulièrement purs. J'agite vigoureusement pendant une minute et laisse reposer. En principe, la coloration obtenue est comparée avec celle produite dans les mêmes conditions par des types constitués avec une solution étalon d'iodure de potassium plus ou moins diluée.

Dans le cas de la terre de l'Ecole d'Horticulture, je n'obtiens, avec la prise d'essai utilisée (25 g.), aucune coloration du sulfure de carbone révélant la présence d'iode en quantité mesurable par la technique employée. Divers essais me montrent qu'avec cette méthode il faut au moins 0 mg. 03 de I pour obtenir une coloration rose-violet visible, ce qui impliquerait pour la terre, en opérant sur 25 g. de celle-ci, une teneur de 1 mg. 2 par kilogramme. Sans doute, le dosage pourrait être effectué sur un poids plus considérable de cette terre, mais cela n'apparaît guère possible avec un tube à combustion, des moyens de chauffage et des flacons absorbeurs normaux. J'ai donc essayé d'effectuer le dosage de l'iode par une autre méthode.

2° Dosage selon R. L. ANDREW. — La méthode employée par cet auteur est une variante de celle suivie par Th. von FELLEBERG [294]. Elle n'est pas exempte de reproches, car des pertes de l'ordre de 30 à 40 p. 100 peuvent se produire lors de la calcination qu'elle nécessite (calcination de la terre en présence du carbonate de potassium dans une simple capsule). Mais des essais préliminaires m'ayant montré sa grande sensibilité (elle permet avec une prise d'essai de 25 g. de terre de doser des quantités d'iode correspondant à 0 mg. 2 par kg.), je l'ai utilisée néanmoins dans le seul but d'apprécier un ordre de grandeur, plus qu'une richesse absolue. On se reportera au mémoire original pour en connaître les détails. Grossièrement, elle comporte d'abord, ainsi que je viens de le dire, la calcination de la terre dans une simple capsule en présence d'une quantité suffisante de carbonate de potassium particulièrement pur<sup>1</sup>, puis l'épuisement de la matière par de l'eau bouillante, la filtration et l'évaporation à sec du liquide obtenu, l'extraction hydro-alcoolique plusieurs fois répétée du résidu soigneusement calciné, la détermination colorimétrique de l'iode sur le nouveau résidu provenant de l'évaporation des liquides d'épuisement, ledit résidu étant repris par quelques gouttes d'eau, 0 cm<sup>3</sup> 03 de chloroforme et 3 gouttes d'acide sulfurique contenant du nitrite de sodium et le tout centrifugé.

Dans cet essai, comme dans le précédent avec la méthode de J. S. Mc HARGUE, je n'obtiens avec 25 g. de sol aucune coloration caractéristique susceptible de révéler la présence de l'iode dans la terre de l'Ecole d'Horticulture à une dose égale ou supérieure à 0 mg. 2 par kilogramme, dans les conditions où je me suis placé. Là encore, il semble difficile d'opérer sur une prise d'essai plus importante vu les quantités importantes de réactifs à utiliser dans ce cas (notamment de carbonate de potassium), réactifs susceptibles d'introduire alors malgré tout le soin apporté à leur préparation une cause de trouble, la teneur du sol en iode si celui-ci est présent étant de toute évidence extrêmement faible.

*Chrome.* — J'ai effectué la première partie du dosage du chrome, c'est-à-dire celle se rapportant à l'isolement de ce métal du sol où je le supposais présent, par la méthode de W. F. HILLEBRAND [678]. En voici le résumé :

10 g. de terre de l'Ecole d'Horticulture, finement broyés dans un mortier d'agate, sont calcinés dans une grande capsule de platine afin de détruire la matière organique. Ils sont ensuite fondus dans la capsule avec un mélange constitué par 40 g. de carbonate de sodium et 3 g. de nitrate de potassium particulièrement purs, ces deux sels étant également finement pulvérisés. La masse fondue est ensuite brisée et mise à digérer dans une grande capsule en porcelaine avec 600 cm<sup>3</sup> d'eau bi-distillée. Un peu d'alcool est ajouté goutte à goutte pour réduire les manganates. Le liquide est filtré et le résidu lavé avec une solution diluée de carbonate de sodium. Le filtrat est alors neutralisé avec de l'acide nitrique, en présence de rouge de méthyle comme indicateur, puis évaporé jusqu'à presque complète dessiccation. Les nitrates formés sont redissous dans l'eau et le résidu silice-alumine qui subsiste est recueilli sur un filtre, lavé, séché et brûlé dans un récipient en platine. Le filtrat contient la majeure partie du chrome. Le résidu calciné est néanmoins mis à digérer avec de l'acide fluorhydrique et de l'acide sulfurique fumant. Le nouveau résidu de cette attaque est après séparation, lavage et dessiccation, fondu avec du carbonate de sodium et la masse obtenue redissoute dans l'eau bi-distillée et neutralisée exactement comme précé-

---

1. Comme pour le dosage du bore, j'ai préparé ce carbonate par calcination du bitartrate de potassium R. P. recristallisé.

demment avec de l'acide nitrique. Le liquide est mis à bouillir jusqu'à coagulation du précipité formé et filtré. Ce filtrat réuni au précédent est, après expulsion de  $\text{CO}_2$  par une très légère ébullition, additionné peu à peu de nitrate mercurieux (solution récente) qui précipite le chrome et certains autres éléments, tels le vanadium, pouvant être présents. Le précipité obtenu est recueilli sur un filtre, lavé, calciné et fondu avec du carbonate de sodium. La matière fondue est enfin dissoute dans l'eau. On filtre et on lave avec une solution de carbonate de sodium diluée, de manière à obtenir exactement  $10 \text{ cm}^3$ .

Pour estimer le chrome supposé présent et rassemblé dans ce liquide, j'ai eu recours à la réaction de CAZENEUVE, précédemment utilisée par D. BRARD [679] pour le dosage colorimétrique du métal dans les tissus animaux, au cours d'une étude toxicologique de ce dernier. CAZENEUVE [680] a, en effet, préconisé comme réactif très sensible du chrome la diphénylcarbazine qui, en solution alcoolique à 2 p. 1.000, donne avec le métal en milieu acidifié par  $\text{HCl}$  une coloration violette très intense, insoluble dans le benzène. (Le fer et le cuivre qui peuvent être également décelés par le réactif de CAZENEUVE ne donnent pas la coloration violette en présence de  $\text{HCl}$  libre en excès. D'autre part, la coloration produite avec le cuivre est soluble dans le benzène.)

Je transvase les  $10 \text{ cm}^3$  de liquide correspondant à  $10 \text{ g.}$  de terre dans une fiole jaugée de  $25 \text{ cm}^3$ . J'ajoute  $5 \text{ cm}^3$  d' $\text{HCl}$  et, après disparition de l'effervescence, quelques gouttes d'une solution alcoolique de diphénylcarbazine. Je complète à  $25 \text{ cm}^3$  avec de l'eau bi-distillée et je compare la coloration violette très pâle obtenue (dont je vérifierai ultérieurement l'insolubilité dans le benzène) à celle produite dans les mêmes conditions par des types réalisés avec une solution-étalon d'un chromate, convenablement diluée. Des liquides résultant d'essais à blanc réalisés exactement de la même manière que celui avec la terre n'ont donné aucune coloration avec la diphénylcarbazine.

*Manganèse (total).* — J'ai dosé le manganèse total de la terre de l'Ecole d'Horticulture, en opérant sur  $1 \text{ g.}$  de celle-ci et en suivant exactement la technique bien connue de G. BERTRAND. Pour les détails, on se reportera donc soit au mémoire original [681], soit à mon *Guide pour l'étude expérimentale du sol* [652 i).

*Manganèse (assimilable).* — Depuis déjà longtemps G. BERTRAND a fait remarquer que le manganèse existe dans la terre arable à des états très différents. D'après cet auteur [681] « on peut l'y trouver, par exemple, comme carbonate et comme phosphate, c'est-à-dire sous des formes assez facilement solubles dans l'eau chargée d'acide carbonique ou d'autres acides faibles ; il peut y en avoir aussi sous des formes organiques plus ou moins complexes contenues dans les débris végétaux ou liées dans les corps humiques ; une partie, généralement la plus importante, s'y rencontre comme oxyde, des, solubles dans l'acide chlorhydrique concentré, mais ne pouvant sans doute être utilisés que très lentement par les plantes, à la suite de réactions, soit purement chimiques, soit provoquées par les micro-organismes. Enfin, une dernière fraction est encore fortement engagée à l'état de combinaisons résistantes, telles que les silicates. Quand le manganèse est présent dans le sol sous des formes assimilables en proportions suffisantes, il n'y a pas de bénéfice à attendre de l'emploi des engrais manganésés ; quand, au contraire, il s'y trouve seulement sous des formes peu accessibles aux plantes, l'apport de petites quantités de combinaisons solubles de manganèse produit des augmentations de récolte extrêmement remarquables, parfois même surprenantes ». On a vu, en outre, précédemment (« Revue des travaux antérieurs ») toute l'importance du manganèse existant dans le sol sous une forme facilement soluble. Pour apprécier ce manganèse assimilable, en se rapprochant des conditions naturelles, G. BERTRAND préconise la détermination de la fraction de ce métal soluble dans l'acide acétique à 1 p. 100. Comme A. DEMOLON [659 a] je préfère à cette solubilité acétique la solubilité citrique parce que l'acide citrique à 2 p. 100 est souvent utilisé comme réactif de l'assimilabilité des éléments minéraux des sols et aussi comme l'auteur précité l'a constaté dans l'étude des scories de déphosphoration [54], l'acide citrique est un meilleur dissolvant du manganèse que l'acide acétique de même concentration.

J'ai donc dosé comme manganèse assimilable de la terre de l'Ecole d'Horticulture le métal existant dans cette dernière, susceptible de se dissoudre dans l'acide citrique à 2 p. 100.

$30 \text{ g.}$  de terre ont été introduits dans un flacon de  $250 \text{ cm}^3$  avec  $150 \text{ cm}^3$  d'une solution d'acide citrique R. P. à 2 p. 100 et agités pendant quatre heures à l'agitateur rotatif. Après repos et filtration du liquide, j'ai prélevé de ce dernier  $100 \text{ cm}^3$  qui ont été évaporés à sec. J'ai ensuite calciné, avec précaution, au rouge sombre le résidu obtenu afin de détruire complètement sa matière organique. Après addition de  $\text{HCl}$  et nouvelle évaporation à sec pour insolubiliser la silice, j'ai repris par  $\text{HCl}$  concentré en léger excès, afin de dissoudre l'oxyde de manganèse. Après digestion au bain-marie j'ai ajouté  $5 \text{ cm}^3$  de  $\text{SO}_4\text{H}_2$  au  $1/10$  pour transformer les chlorures en sulfates et j'ai ensuite continué le dosage comme celui du manganèse total en suivant très exactement la technique de G. BERTRAND.

**Cuivre et Zinc.** — J'ai effectué simultanément les dosages de ces deux métaux sur 1 kg. de terre de l'Ecole d'Horticulture par la méthode de G. BERTRAND et L. MOK-RAGNATZ, appliquée très scrupuleusement. Pour les détails de cette méthode, on se reportera, comme pour le manganèse, soit aux mémoires des auteurs [682], soit à mon *Guide pour l'étude expérimentale du sol* [652 i].

Je rappelle seulement que celle-ci aboutit, après isolement et séparation des deux métaux à l'état de sulfures, au dosage du cuivre par colorimétrie de sa solution ammoniacale et à celui du zinc par pesée sous forme de sulfate.

**Plomb.** — J'ai recherché le plomb pouvant exister dans la terre considérée et j'ai apprécié la quantité trouvée, au moyen de la technique utilisée pour un but analogue par G. BERTRAND et Y. OKADA [683]. Celle-ci peut se résumer ainsi : Attaque de 100 à 200 g. (j'ai opéré sur 150 g.) de terre séchée et calcinée dans une capsule de porcelaine par HCl pur jusqu'à cessation d'effervescence ; évaporation à siccité au bain-marie pour insolubiliser la plus grande partie de la silice ; reprise du résidu par HCl concentré, dilution de la masse et filtration du liquide acide ; saturation de ce dernier par H<sup>2</sup>S préalablement filtré à travers un tampon d'ouate ; récolte après vingt-quatre heures en vase clos du précipité noir formé ; lavage et grillage de celui-ci en capsule de porcelaine. Ensemble d'opérations répété deux fois sur le résidu terreux insoluble dans l'acide pour s'assurer de l'extraction complète des métaux précipitables par H<sup>2</sup>S. Ensuite réunion après grillage des trois (?) précipités sulfurés obtenus ; addition à ces derniers d'un peu de NO<sup>3</sup>H concentré et de quelques gouttes de SO<sup>4</sup>H<sup>2</sup> ; évaporation presque à sec, addition de quelques centimètres cubes d'eau et d'un volume double d'alcool à 95°. Après repos en capsule couverte, filtration du liquide surnageant contenant surtout le cuivre, lavage du précipité avec de l'alcool au ½, dessiccation et calcination de ce précipité ainsi que du filtre avec toutes les précautions d'usage. Pesée du sulfate de plomb. Purification de ce dernier par traitement à l'acétate d'ammonium à 20 p. 100, nouvelle précipitation par H<sup>2</sup>S. Grillage et conversion en sulfate du sulfure comme précédemment. Pesée finale du sel de plomb et vérification de son identité par plusieurs réactions caractéristiques.

Essai à blanc réalisé de la même manière afin de s'assurer de la pureté des réactifs utilisés.

Les déterminations effectuées selon les méthodes qui viennent d'être exposées ont montré que la terre de l'Ecole d'Horticulture renfermait les divers oligo-éléments étudiés, dans les proportions ci-après, étant bien entendu que *ces nombres indiquent seulement les quantités totales présentes* (exprimées en mg. par kg. de terre), sauf pour le manganèse, dont la fraction assimilable a pu être précisée. En ce qui concerne l'iode, il convient sans doute de faire des réserves pour les raisons exposées précédemment, mais ce métalloïde était vraisemblablement présent à l'état de traces dans la terre considérée.

POUR 1.000 G.  
DE TERRE FINE  
SUPPOSÉE SÈCHE

|                          | en mg. |
|--------------------------|--------|
| Bo. . . . .              | 1,2    |
| F . . . . .              | 208    |
| As . . . . .             | 3,3    |
| I . . . . .              | 0,25   |
| Cr . . . . .             | 0,29   |
| Mn total . . . . .       | 222    |
| Mn assimilable . . . . . | 111    |
| Cu. . . . .              | 9,5    |
| Zn. . . . .              | 32     |
| Pb . . . . .             | 3,4    |

Il me semble utile de rapprocher ces chiffres de ceux trouvés par d'autres auteurs. Cette confrontation n'aura cependant qu'un caractère purement indicatif et non comparatif, puisque les résultats qui seront cités concernent d'autres terres et ont été le plus souvent obtenus avec des méthodes différentes de celles que j'ai utilisées.

**Bore.** — F. TERLIKOWSKI et B. NOWICKI [684] (1932) par la méthode de G. BERTRAND et H. AGULHON ont trouvé dans des sols de Pologne des quantités de bore variant de 1 à 14 mg. par kilogramme. G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN [670] (1939) ont dosé dans divers sols de France 7 à 30 mg. par kilogramme. G. LUCHETTI [685] (1938) opérant par distillation directe de la terre avec de l'alcool méthylique et de

L'acide sulfurique a trouvé dans 10 échantillons provenant de la zone boracifère de Larderello (Italie), de 23 à 100 mg. du métalloïde par kilogramme.

*Fluor.* — Dans son étude des sols américains, W. O. ROBINSON [686] (1914) constata dans 24 échantillons examinés l'existence du fluor indiquée par la présence de micas. L. A. STEINKENIG [687] (1919) a dosé le fluor dans des échantillons (surface et sous-sol) appartenant à 9 types différents de sol. Il y a trouvé une teneur en F de l'ordre de 300 mg. par kilogramme, celui-ci provenant des minéraux suivants : biotite, tourmaline, muscovite, apatite, fluorine, phlogopite. De plus grandes quantités de l'élément ont été rencontrées dans des terrains renfermant une proportion notable de micas.

*Arsenic.* — W. P. HEADDEN [688] (1910) examinant des sols du Colorado constate que l'arsenic est très répandu dans les sols vierges où il existe à des doses variant de 2 mg. 5 à 5 mg. par kilogramme. La marne sur laquelle reposent ces sols en contient beaucoup plus (15 mg. par kg.). J. E. GREAVES [689] (1913) trouve de même que certains sols vierges renferment de l'arsenic en quantités appréciables, celui-ci provenant de la destruction de la roche-mère. Analysant 50 sols de vergers de nature variée, le même auteur [689 a] (1934) y décèle des quantités oscillant entre 8 et 411 kg. d'arsenic total par hectare (couche de 0 m. 30 de profondeur), entre 0 kg. 784 et 35 kg. 7 de As soluble à l'eau, ces résultats étant obtenus par la méthode de MARSH modifiée à cause de la présence de grandes quantités de fer. J. S. Mc HARGUE [690] (1924) dose dans un sol vierge du Kentucky 10 mg. 8 d'arsenic par kilogramme de terre. G. ZUCCARI [691] (1913) en Italie trouve des teneurs de 1 mg. 8 à 60 mg. par kilogramme de terre, celles-ci étant en relation avec celles en fer. I. F. REICHERT et R. A. TRELLES [692] (1921) dosent 8 à 22 mg. 5 de As. par kilogramme dans des sols de l'Argentine, mais ne peuvent vérifier le rapport entre le taux de cet élément et le taux de fer. Par contre, ils en établissent un entre la richesse en As des terrains et celle des eaux souterraines correspondantes. Ce dernier ne peut cependant être confirmé par K. HIRAI et K. TCHIRO [693] (1938) qui trouvent dans 27 sols japonais de formation géologique différente 8 mg. 0 à 51 mg. 3 de As total par kilogramme et de 0 mg. 03 à 3 mg. 36 de As soluble dans l'eau. C. S. SLATER, R. S. HOLMES et H. G. BYERS [673] (1937) dans leur étude sur l'érosion citent des chiffres s'échelonnant entre 1 et 83 mg. de As. par kilogramme de terre pour les sols américains considérés et observent souvent une accumulation de As dans l'horizon illuvial. R. HERRMANN et H. KRETZ DORN [694] (1939), dans des sols de vignobles traités par des insecticides arsenicaux, ont dosé des quantités d'arsenic variant de 120 à 600 mg. par kilogramme.

*Iode.* — Dès 1852, A. CHATIN [695] avait signalé la présence de l'iode dans divers sols et il constatait notamment que ceux formés « par le sable jaune et les meulrières superposées aux marnes argileuses du gypse dans la Brie, la Beauce, le Bourbonnais, la Bourgogne étaient plus riches en métalloïde que les terres argileuses de la Bresse ou des environs de Bourgoin, Grenoble, Chambéry, ces dernières l'étant davantage d'ailleurs que les terres noires, légères, superposées aux schistes du lias dans la Tarentaise, la Maurienne et le Val d'Aoste ». J. STOKLASA [296] (1924) a décelé la présence de l'iode dans les terres arables d'origine silurienne, carbonifère et tertiaire, le métalloïde y existant à une dose de 1 mg. par kilogramme de terre sèche. Th. von FELLEBERG [696] (1924) dans les terres qu'il a examinées trouve des quantités d'iode oscillant entre 0 mg. 6 et 6 mg. par kilogramme de terre. Dans un petit nombre (terres anglaises et écossaises) il en trouve de 2 mg. 4 à 8 mg. et dans un sol provenant des îles Falkland, il en dose 25 mg. par kilogramme. L'auteur ne constate aucun rapport entre la teneur en iode du sol et la formation géologique de ce dernier. J. H. MITCHELL, J. D. WARNER et K. S. MORROW [697] (1928) ont trouvé dans les sols de la Caroline du Sud de 0 mg. 76 à 3 mg. 02 d'iode par kilogramme. Dans des terrains côtiers exposés aux inondations. J. BECK a dosé de 13 à 28 mg. 3 de métalloïde par kilogramme de terre. D'autre part, cet auteur [698] (1930) remarque que la teneur en iode des sols dépend de leur constitution physique. Les terres fortes contiennent plus d'iode que les terres légères, du fait de leur richesse en particules très fines (limon et argile) qui l'absorbent facilement. J. S. Mc HARGUE [675] (1931) dans un sol sableux vierge a dosé 0 mg. 61 d'iode par kilogramme et dans le même sol cultivé 0 mg. 30. Avec D. W. YOUNG [699] (1933), le même auteur a trouvé 2 à 6 mg. par kilogramme dans les sols du Kentucky, la plus grande quantité de métalloïde étant rencontrée dans les sols dérivant du grès calcaire. Les sols marins de Hollande sont particulièrement riches en iode. Ils en renferment, d'après J. F. REITH [700] (1933), de 4 à 40 kg. par hectare labouré profondément. Ceux de Bavière, d'après K. SCHARRER [701] (1935), contiennent des quantités de métalloïde variant de 0 mg. 63 à 12 mg. 18 par kilogramme de terre sèche ; ceux de Tchécoslovaquie, selon L. ŠMOLIK [702] (1935), ont une teneur variant entre 0 mg. 2 et 6 mg. 5 par kilogramme, la quantité maximum paraissant se trouver dans la couche supérieure des profils. Cet auteur ne constate d'ailleurs aucune corrélation entre l'iode contenu dans le sol et celui existant dans la roche-mère originelle. A. ITANO

et Y. TSUJI [703] (1934) ayant analysé 112 échantillons de sols japonais ont observé que la majorité de ces derniers contenait de 1 à 3 mg. d'iode par kilogramme ; 15 p. 100 en contenaient plus de 10 mg. ; la teneur la plus faible était de 0,49. C'étaient les sols des formations quaternaires les plus âgées qui avaient la richesse la plus élevée et ensuite les plus jeunes de la même époque. Les autres sols, au point de vue de cette richesse, se classaient dans l'ordre suivant : argileux, de limon, sableux et de limon sableux. Les sols ayant le pH le plus élevé contenaient plus d'iode que les autres. K. HIRAI et B. TAKAJI [704] (1937) ont confirmé ces observations, mais les quantités d'iode dosées par ces auteurs dans 60 sols vierges japonais des districts du centre et de l'ouest variaient entre 0 mg. 0 et 58 mg. 12 par kilogramme. Il y a encore lieu de signaler que R. L. ANDREW [676] (1930) avait trouvé par sa méthode, dans les 300 sols de 7 régions différentes de la Nouvelle-Zélande qu'il avait analysés, des différences encore plus grandes, allant de 0 mg. 8 à 210 mg. par kilogramme.

*Chrome.* — W. O. ROBINSON [686] (1914) étudiant systématiquement divers types de sols américains y a constaté la présence du chrome, depuis des traces jusqu'à 250 mg. par kilogramme. Dans une étude plus récente, limitée aux sols infertiles, cet auteur, avec G. EDDINGTON et H. G. BYERS [708] (1935), a trouvé, dans un de ces derniers 38,6 p. 1.000 d'oxyde de chrome. W. THOMAS [706] (1923), en Pennsylvanie, a également reconnu la présence du chrome dans le sol. F. E. HANCE [36] (1933), utilisant la technique spectrographique, a caractérisé ce métal dans les sols des îles Hawaï. A. DINGWALL et H. T. BEANS [707] (1934), employant la même méthode, ont trouvé du chrome dans plusieurs sols (surface et sous-sol) de la province de Québec. C. S. SLATER, R. S. HOLMES et H. G. BYERS [673] (1937), dans leur étude déjà citée et qui concernait 11 profils de sols-types américains, indiquent pour ces derniers une teneur en chrome de 0 à 93 mg. par kilogramme.

*Manganèse.* — Nombre d'auteurs ont dosé le manganèse dans des sols très divers. Néanmoins, une incertitude règne sur les résultats obtenus, la plupart des expérimentateurs ne précisant pas leur mode opératoire ou considérant comme manganèse total le métal soluble dans l'acide chlorhydrique concentré. Dès 1910, cependant, G. BERTRAND [708] avait fait remarquer que Mn pouvait exister dans les sols à l'état d'oxyde ou de silicate très difficilement attaquable et les résultats trouvés par A. DEMOLON, cités ci-après confirment cette assertion. La plupart des chiffres donnés dans cette rubrique n'ont donc qu'un intérêt purement historique.

En 1908, P. DE SORNAY [709], analysant un certain nombre de sols de l'île Maurice, trouve des quantités de Mn soluble dans les acides forts variant de 0,267 à 4,09 p. 1.000. En 1912, le même auteur [710] publie une autre série de chiffres oscillant entre 0,550 et 3,22 p. 1.000. A. CONTINO [711] (1911) dose le manganèse dans 21 échantillons de sols de l'Italie méridionale et 2 de l'Italie septentrionale ; il trouve comme minimum 0 g. 216 et comme maximum 3 g. 45 par kilogramme de terre. O. M. SHEDD [712] (1914), dans le Kentucky, trouve moins de manganèse dans les sols cultivés que dans les sols vierges et aussi moins dans le sous-sol (0 g. 020 à 2 g. 64 par kg.) qu'à la surface (de 0 g. 05 à 3 g. 31 par kg.). A. K. BRYNILDSEN [713] (1915) dose dans des sols de Norvège 0,2 à 2 p. 1.000 de métal. K. KRUMINS [714] (1931), analysant des sols lettons, constate que les sols à gravier sont les plus riches en manganèse (0,046 à 2,08 p. 1.000) et les sols sableux les plus pauvres (traces à 0,688 p. 1.000). Des sols tourbeux acides contenaient 0,085 à 0,116 de Mn, mais certains sols de tourbières basses en renfermaient de 0,371 à 2,13 p. 1.000. L. J. TEAKLE, A. J. HOARE et I. THOMAS [715] (1933) ont trouvé dans des sols de l'Australie des quantités de métal solubles dans HCl concentré, variant de 0,050 à 6,48 p. 1.000 ; A. W. BLAIR et A. L. PRINCE [716] (1936) dans ceux de New-Jersey, de 0,100 (sable de Norfolk) à 1,93 (sol de Penn) de Mn p. 1.000. A. L. RAO [717] (1937) examinant des sols à canne à sucre remarque que le manganèse contenu dans la majorité des sols fertiles varie de 0,4 à 1,5 p. 1.000.

En ce qui concerne les sols français, R. CHAVASTELON [718] (1923) examinant une cinquantaine d'échantillons de terres d'Auvergne appartenant aux alluvions sableuses, aux terrains granitiques ou schisteux, volcaniques, silico et argilo-calcaires trouve des quantités de Mn oscillant entre 0,10 et 1,60 p. 1.000. Effectuant parallèlement sur les mêmes sols le dosage du fer, l'auteur constate un rapport entre les deux métaux : la teneur en manganèse dans les sols considérés croît en même temps que celle du fer.

G. JORET et H. MALTERRE [719] (1935) comparant les sols dérivés des argiles à silex et des biefs avec ceux des limons de Picardie constatent que le manganèse soluble dans l'acide chlorhydrique bouillant augmente en même temps que l'argile aussi bien dans les premiers sols que dans les seconds. Ces auteurs trouvent dans les sols provenant d'argiles à silex des teneurs en manganèse oscillant entre 0,25 et 1,10 p. 1.000 pour des taux d'argile variant de 92 à 437 p. 1.000 ; dans les sols de limon ils dosent de 0,22 à 0,67 de Mn pour des quantités d'argile comprises entre 67 et 174 p. 1.000. Mais les résultats les plus instructifs sont ceux obtenus par A. DEMOLON [659 b] (1926) qui a dosé à la fois, dans des sols de limon du Saint-Quentinois et du Cambrésis, le manga-

nèse *total* et le manganèse *assimilable* (Mn soluble dans l'acide citrique à 2 p. 100) par les méthodes utilisées dans le présent travail, comparativement avec le manganèse soluble dans l'acide chlorhydrique concentré. Voici cette répartition pour plusieurs sols et sous-sols correspondants :

POUR 1.000 DE TERRE

|               |                            | Mn total | Mn soluble dans HCl | Mn soluble dans acide citrique |
|---------------|----------------------------|----------|---------------------|--------------------------------|
| Marest        | Sol . . . . .              | 0,16     | »                   | »                              |
|               | Sous-sol (terre à briques) | 0,48     | »                   | »                              |
| Saint-Quentin | Sol . . . . .              | 0,36     | 0,23                | 0,12                           |
|               | Sous-sol (terre à briques) | 0,32     | 0,30                | 0,06                           |
| Vendeuil      | Sol . . . . .              | 0,32     | 0,10                | 0,08                           |
|               | Sous-sol (terre à briques) | 0,30     | 0,23                | 0,05                           |

**Cuivre.** — L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY [720] (1919) ont dosé le cuivre dans des terres d'origines très diverses, terres arables proprement dites et terres de vignobles ayant reçu des apports de cuivre par suite de la pulvérisation régulière de bouillies cupriques. Dans les premières, ils ont trouvé des quantités oscillant entre 2 mg. (terre de labour de l'Aveyron) et 50 mg. (pépinière du Muséum) de Cu par kilogramme de terre sèche ; dans les secondes, de 30 (Clos du Puits, Aigues-Mortes) à 250 mg. (terre du vignoble de Beauvoisin (Gard), traité au cuivre depuis 1883). A. DEMOLON [659 c] (1926) dans les sols de limon cités ci-dessus a trouvé respectivement 1 mg. 25 (Marest), 1 mg. 60 (Saint-Quentin) et 2 mg. 30 (Vendeuil) de Cu par kilogramme ; dans les sous-sols correspondants (terre à briques) il a dosé 0 mg. 83, 1 mg. 00 et 1 mg. 50 du métal par kilogramme. R. RUSSELL et T. F. MANNS [535] (1933) analysant 37 échantillons de sols de Puerto-Rico, de Hawaï et de régions variées des Etats-Unis trouvent des quantités comprises entre 1 mg. (sol sablo-argileux de l'est des Etats-Unis) et 140 mg. (limon argileux de Puerto-Rico) de Cu par kilogramme de terre. C. S. SLATER, R. S. HOLMES et H. G. BYERS, dans leur mémoire sur les sols américains déjà cité [673] (1937), signalent dans ces derniers de 1 à 44 mg. 6 de Cu par kilogramme. J. S. Mc HARGUE [690] (1924) examinant antérieurement un sol vierge du Kentucky avait dosé dans celui-ci 7 mg. 2 de Cu par kilogramme. E. G. MULDER [24] (1938), utilisant l'*Aspergillus niger* comme indicateur du cuivre dans les sols, trouve des quantités de cuivre assimilable par la moisissure comprises entre 0 mg. 1 et 2 mg. 5 par kilogramme dans des sols sablonneux et tourbeux de la Hollande.

**Zinc.** — DIEULAFAIT [721], en 1880, avait constaté la présence du zinc dans un certain nombre de roches de la formation primaire et dans les dépôts qui résultaient de leur destruction. C. MONTANARI [722] (1921) a signalé l'existence de traces de zinc dans les sols des environs de Pavie. M. MOKRAGNATZ [723] (1922) a dosé dans 78 échantillons de terre provenant de la Seine-Inférieure, du Finistère, du Calvados, de l'Yonne et du Gard des quantités de zinc oscillant entre 4 mg. 8 (terre de jardin de Sotteville-les-Rouen) et 87 mg. 7 (terre granitique de Genolhac, Gard) par kilogramme de sol. J. S. Mc HARGUE [696] (1924), dans le sol vierge du Kentucky qu'il a étudié, a dosé 27 mg. 7 de Zn par kilogramme. H. LUNDEGARDH [724] (1927) trouve, dans des sols de la partie sud de la province de Dalarna, en Suède, des quantités comprises entre 170 mg. et 350 mg. par kilogramme à la surface et de 70 mg. à 400 mg. dans le sous-sol. A. L. S. RAO [717] (1937) analysant des sols à canne à sucre observe que le zinc contenu dans les sols fertiles oscille entre 300 et 600 mg. par kilogramme. Antérieurement. A. O. ALBEN et H. M. BOGGS [586] (1936) remarquaient que les sols basiques étaient plus riches en zinc que les sols acides qu'ils examinaient, les quantités trouvées variant d'ailleurs très largement (de 4 mg. à 146 mg. par kg.). C. S. SLATER, R. S. HOLMES et H. G. BYERS [673] (1937) ont dosé des quantités du même ordre (de 3 à 147 mg. Zn par kg.) dans les sols américains qu'ils ont étudiés.

**Plomb.** — G. BERTRAND et Y. OKADA [725 et 683] (1933) ont reconnu l'existence du plomb dans la terre arable et ont même trouvé une proportion relativement élevée de ce métal (0 g. 207 à 0 g. 261 par kg. de terre sèche) dans des échantillons de sol prélevés dans le jardin de l'Institut Pasteur de Paris. K. HIRAI et B. TAKAJI [726] (1937) ont décelé du zinc et du plomb dans 28 sols japonais au moyen de l'analyse spectrale.

Bien qu'il semble délicat, ainsi que je l'ai fait remarquer en ouvrant la grande parenthèse ci-dessus, de comparer mes résultats avec ceux obtenus sur d'autres terres au moyen de méthodes souvent très différentes, par nombre d'auteurs que j'ai tenu à citer, il apparaît cependant d'après mes chiffres que la terre de l'Ecole d'Horticulture ne se distingue pas par une richesse exceptionnelle en « biocatalyseurs ». Sans doute, sa forte teneur en matières organiques aurait pu faire supposer le contraire, mais il ne faut pas oublier que le sol en dehors de légères modifications dans sa composition initiale par suite d'un apport extérieur et continu, comme c'est présentement le cas, est avant tout le reflet plus ou moins immédiat de la ou des roches d'où il émane. Il n'est pas anormal que les éléments sableux renfermés essentiellement par la terre considérée soient peu riches en débris de minéraux variés.

En tout cas, cette richesse très moyenne en « oligo-éléments » du sol choisi pour l'expérience projetée permettait de penser, bien qu'il s'agisse surtout de la richesse totale et non de la portion assimilable, qu'un apport desdits « oligo-éléments » pourrait avoir une influence marquée sur l'espèce végétale cultivée.

Il n'est pas inutile de souligner que l'analyse détaillée de ce sol relatée ci-dessus montre la présence dans une terre commune d'éléments tels que le chrome et le plomb, encore peu étudiés jusqu'ici de façon systématique.

*Fixation du taux d'humidité du sol pendant la culture.* — Une teneur en eau convenable du milieu est une des conditions essentielles de la réussite des essais cultureux. Pendant la durée de ces derniers, il est en effet important d'assurer à la plante un approvisionnement suffisant en eau qui soit en même temps capable de maintenir une structure favorable du sol permettant une bonne manifestation des phénomènes dont il est le siège.

Pour fixer cette humidité optimum de la terre de l'Ecole d'Horticulture, j'ai d'abord déterminé, comme il est d'usage, la capacité maximum pour l'eau de cette terre. Du fait de la richesse en matière organique de cette dernière, sa capacité de rétention était notable. J'ai constaté qu'elle était de l'ordre de 45 p. 100, comme dans la plupart des limons humifères d'ailleurs. Selon l'usage encore, j'ai fixé l'humidité à maintenir dans le sol pendant la durée de la culture aux deux tiers de la capacité maximum pour l'eau dudit sol, soit donc une humidité de 30 p. 100 de terre sèche. Avec ce taux, la terre choisie était suffisamment humide et bien meuble.

*Espèce végétale cultivée.* — Me proposant, ainsi que je l'ai dit au début de ce Mémoire, d'examiner l'influence de divers « oligo-éléments », non seulement sur le développement d'une plante et la « qualité » de cette dernière, mais aussi sur les différents phénomènes microbiens se manifestant dans le sol servant de support et de milieu nutritif, et notamment parmi ces phénomènes la fixation biochimique de l'azote, l'exécution d'un tel projet impliquait évidem-

ment le choix d'une Légumineuse comme plante d'expérience. Est-il besoin de rappeler que la fixation microbienne de l'azote atmosphérique est surtout réalisée dans les conditions naturelles par le *Bac. radicola*, bactérie symbiotique des racines des Légumineuses.

J'ai donc choisi, comme espèce végétale à cultiver, le pois, *Pisum sativum* L. Je me suis arrêté à cette plante en raison de sa rusticité et aussi de sa fréquente utilisation dans des expériences antérieures ayant une certaine analogie avec celles que j'ai entreprises (on a pu en faire précédemment la remarque). Sans chercher à comparer mes résultats avec ceux trouvés par d'autres auteurs dans des conditions tout à fait différentes de celles que j'ai adoptées, il m'a semblé utile, néanmoins, pour des généralisations ultérieures d'expérimenter avec une plante dont les réactions aux « oligo-éléments » avaient déjà été plusieurs fois observées.

J'ai utilisé le pois nain très hâtif d'Annonay (Vilmorin-Andrieux), variété dont le développement normal des parties aériennes et des racines n'était pas très important et cela par commodité. Une plante atteignant de grandes dimensions, ayant d'abondantes et longues racines aurait en effet nécessité pour sa culture un volume de terre considérable et par cela même un récipient difficile à manier. D'autre part, dans une étude de ce genre, il y avait intérêt à ne pas obtenir une trop grande quantité de matière végétale, quitte à opérer plus finement, de façon à supprimer autant que possible, pour les déterminations analytiques devant être effectuées, l'échantillonnage de cette matière. Les causes d'erreurs inévitables dues à la difficulté de celui-ci étaient supprimées si les dosages portaient sur la totalité de la récolte.

« Oligo-éléments » ajoutés. — Ces derniers seront incorporés au sol sous la forme de sels particulièrement solubles (à l'exception du plomb) ne possédant pas d'ions acides ou basiques, susceptibles même en petite quantité d'apporter un trouble dans l'expérience projetée. C'est ainsi qu'évidemment seront proscrits les nitrates, les phosphates ou les sels de potassium. Le bore, le fluor, l'arsenic, l'iode, le chrome seront introduits respectivement sous forme de borate, fluorure, arsénite, iodure, chromate de sodium. Le manganèse, le cuivre, le zinc, seront ajoutés à l'état de sulfates, le plomb également et nécessairement. Ces différents sels porteront la marque R. P. (pour analyses) des Etablissements Prolabo.

L'état étant précisé, il reste à déterminer les doses de chaque oligo-élément qui seront utilisées dans les essais. Ces derniers étant inévitablement limités et désirant mettre en évidence si possible une action utile, j'ai pensé qu'il y avait lieu surtout d'introduire dans chaque vase une quantité d'oligo-élément susceptible de donner aux plantes le développement maximum dans le volume de terre mis à leur disposition. Pour fixer cette quantité, je me suis basé : 1° sur les résultats favorables obtenus avec les doses utilisées dans les expériences antérieures, bien que ces dernières aient été effectuées dans

des conditions différentes de celles que j'ai choisies ; 2° sur des essais préliminaires de germination.

En ce qui concerne les observations antérieures, on a pu constater dans la Revue qui en a été faite précédemment que l'influence favorable de chacun des « oligo-éléments » étudiés avait été exercée le plus souvent par des quantités de 1 à 10 mg. du métalloïde ou du métal par kilogramme de terre. Il y a sans doute là une coïncidence, puisque ces « oligo-éléments » ont des masses atomiques différentes et ne possèdent pas tous la même valence. Néanmoins, je ne pouvais négliger ce fait et c'est un peu celui-ci qui m'a conduit à abandonner pour la détermination des doses dans l'expérience projetée mon idée première qui était de calculer ces dernières en tenant compte des masses atomiques et des valences. D'autre part, mon but n'étant pas dans cette expérience d'établir une comparaison absolue entre les doses des divers éléments considérés mais bien plutôt d'essayer de mettre en évidence l'action de chacun de ces « oligo-éléments », j'ai pensé, comme d'ailleurs nombre de chercheurs qui m'ont précédé, qu'il valait mieux donner un caractère pratique aux essais entrepris en employant pour chacun des catalyseurs des quantités correspondant à des poids simples tels que 1, 2, 5 ou 10 mg. par kilogramme de terre supposée sèche.

Ce sont ces poids que j'ai choisis, pour les essais de germination que j'ai effectués. Dans ma pensée, ces essais visaient un double but. D'abord, celui de vérifier si, dans la terre qui serait employée pour la culture, des doses d'oligo-élément variant de 1 à 10 mg. par kilogramme ne seraient pas toxiques dès le début pour des jeunes plantules, ce qui non seulement anéantirait au bout de peu de temps les efforts faits pour la réalisation d'une expérience de grande envergure, mais rendrait inutilisable la grosse quantité de sol nécessaire par cette dernière. D'autre part, ces essais permettraient, en cas de réussite, de limiter seulement à deux, choisies parmi les plus favorables, les doses d'oligo-élément qui, en fin de compte, seraient utilisées dans l'expérience définitive. Il me semblait difficile, en effet, d'opérer avec un plus grand nombre de doses, vu que je considérais en même temps neuf « catalyseurs », que pour chaque dose l'essai de culture devait être au moins répété et qu'enfin il y avait lieu de prévoir plusieurs essais-témoins. Même ainsi limitée, la tâche que seul j'allais accomplir apparaissait déjà considérable.

Pour que ces essais de germination aient un sens, il était nécessaire qu'ils fussent prolongés pendant un temps suffisamment long afin que la plantule ayant à peu près épuisé les réserves de la graine puisse prélever dans le sol où elle se développerait, et pendant quelque temps, les éléments nécessaires à sa nutrition. G. ANDRÉ [727] a montré, en effet, naguère (1901) qu'en ce qui concerne l'azote, le phosphore et le potassium du sol, ces derniers n'intervenaient dans la vie du végétal que lorsque les cotylédons ne pouvaient plus fournir à la plantule qu'une quantité infime d'aliments. D'autre part, à propos de la méthode des plantes en germination préconisée par NEUBAUER pour la détermination de l'assimilabilité des éléments

du sol, G. BERTRAND [728] (1927) a fait remarquer que l'examen d'une plantule, au bout d'une quinzaine de jours par exemple était insuffisant pour montrer qu'elle trouvait dans le sol envisagé la satisfaction de ses besoins. Seuls, les éléments extrêmement mobiles étaient susceptibles, en un si court délai, de contribuer à la nutrition. Dans le cas particulier des « oligo-éléments » la prolongation des expériences de germination s'imposait donc tout comme elle s'impose pour des « fertilisants » plus communs.

Cependant, même de longue durée, ces expériences ne peuvent donner que des renseignements incomplets, car certains éléments, et le fait sera vérifié au cours de ce travail, sont susceptibles d'agir seulement à un certain moment de la vie de la plante, lorsque cette dernière est en plein développement ou lorsqu'elle commence à produire ses graines. Ces réserves étant faites, voici le détail des essais qu'à titre purement indicatif et pour m'appuyer néanmoins sur une base, même assez fragile, j'ai entrepris. Bien que ces essais aient été effectués sous une forme très réduite, les conditions réalisées sont sensiblement identiques à celles envisagées pour la grande expérience projetée.

*Expériences préliminaires de germination.* — Dans des vases cylindriques, en verre peu attaquable, de 100 cm<sup>3</sup> préalablement tarés, j'ai introduit respectivement un poids de terre de l'Ecole d'Horticulture correspondant à 60 g. de terre supposée sèche, portée par addition d'eau redistillée dans un appareil en verre à une humidité de 30 p. 100 de terre sèche. Avec l'eau nécessaire à l'humidification a été ajouté à l'état de dissolution (ou de suspension dans le cas du plomb) le sel pur apportant sous la forme et à la dose indiquées ci-dessus l'« oligo-élément » dont l'étude était envisagée. A ces 36 lots ainsi constitués correspondant chacun à un oligo-élément présent à une dose bien déterminée, j'en ai ajouté 4 réalisés avec de la terre humide seule et destinés à servir de témoins.

Dans chacun de ces lots de terre humide et *bien meuble*, j'ai réparti le 17 février 1939, à une profondeur identique (5 mm.) 6 graines de pois nain très hâtif d'Annonay (Vilmorin-Andrieux), bien conformées, de même apparence et pesant chacune à très peu près le même poids (de 0 g. 204 à 0 g. 208). Tous les récipients ont été ensuite recouverts d'un verre de montre (ne clôturant pas hermétiquement pour laisser une aération suffisante) et placés, à l'abri d'un apport extérieur (NH<sup>3</sup>), dans une étuve à germination de SCHRIBAUX réglée à 27° C., température optimum à laquelle s'effectue la germination du pois.

Les graines ont commencé à germer, pour la majorité des lots, dès le 21 février, pour le reste le 25 février, sauf cependant pour ceux ayant reçu du fluor. *Des doses de 5 et 10 mg. de cet « oligo-élément » par kilogramme de terre ont exercé, en effet, une action nettement retardatrice*; c'est le 4 mars seulement que les graines en contact avec ces proportions d'« oligo-élément » ont germé. Par contre, *des doses de 5 et 10 mg. de chrome par kilogramme de terre ont accéléré le développement de la plantule.*

A cette date du 4 mars, les récipients sont sortis de l'étuve et complètement découverts. Je constate que si, dans la plupart de ces derniers, les 6 graines semées ont germé, il n'y a dans quelques-uns que 5 petites plantules. Afin d'avoir un même nombre de plantes dans chaque lot et adoptant celui de cinq, j'enlève avec précaution, là où il est nécessaire, une graine germée se trouvant de ce fait en excédent. Les vases sont ensuite transportés dans une pièce spéciale du laboratoire dont la température 18°5 est à peu près constante et placés devant une fenêtre, dans des conditions d'éclairage sensiblement identiques, à l'abri des impuretés (poussières ou

vapeurs). Ils resteront dans cette position jusqu'au 11 avril. Pendant toute la période comprise entre le 17 février et le 11 avril, l'humidité des sols a été maintenue au taux initial de 30 p. 100 de terre sèche, par des arrosages fréquents à l'eau bi-distillée, effectués avec une pipette et vérifiés par la pesée.

Le 11 avril 1939, j'ai séparé avec soin les jeunes plantes (parties aériennes seulement) des sols sur lesquels elles avaient poussé. En général, l'aspect des lots récoltés était à peu près semblable; les dimensions des tiges et des feuilles ne semblaient guère les unes et les autres très différentes. Il y avait lieu toutefois de noter que si partout les tiges étaient bien développées, les feuilles, pourvues cependant de chlorophylle, ne l'étaient guère et cela en raison de la luminosité inévitablement insuffisante à l'époque des expériences. Chacun de ces lots de tiges et feuilles (seules parties intéressantes dans ces essais préliminaires) correspondant à une dose donnée d'un « oligo-élément » a été séché à l'étuve d'abord à 40°, puis à 100-105° jusqu'à poids constant.

Voici les poids de matière sèche trouvés :

Témoins (4)  $\left\{ \begin{array}{l} a) 0 \text{ g. } 180 \\ b) 0 \text{ g. } 178,5 \\ c) 0 \text{ g. } 181 \\ d) 0 \text{ g. } 177 \end{array} \right.$

|    | AVEC ADDITION, PAR KG. DE TERRE SUPPOSÉE SÈCHE, DE |       |       |        |
|----|----------------------------------------------------|-------|-------|--------|
|    | 1 mg.                                              | 2 mg. | 5 mg. | 10 mg. |
|    | g.                                                 | g.    | g.    | g.     |
| Bo | 0,186                                              | 0,214 | 0,206 | 0,204  |
| F  | 0,187                                              | 0,198 | 0,163 | 0,156  |
| As | 0,180                                              | 0,186 | 0,198 | 0,195  |
| I  | 0,210                                              | 0,207 | 0,205 | 0,210  |
| Cr | 0,207                                              | 0,222 | 0,208 | 0,196  |
| Mn | 0,168                                              | 0,189 | 0,194 | 0,192  |
| Cu | 0,191                                              | 0,190 | 0,179 | 0,180  |
| Zn | 0,205                                              | 0,218 | 0,185 | 0,183  |
| Pb | 0,170                                              | 0,198 | 0,196 | 0,188  |

Ces résultats indiquent tout d'abord et pour tous les lots, une production de matière sèche peu élevée si on la compare au poids de 5 graines semées<sup>1</sup> et cela, je le répète, par suite d'un manque de lumière, pendant la durée des essais, lumière indispensable à l'assimilation du carbone. On se reportera, à ce sujet, aux travaux classiques de J. B. BOUSSINGAULT, sur la végétation dans l'obscurité [729] (1864). Cependant, la concordance satisfaisante des témoins montre, malgré l'anomalie que je viens de signaler, la bonne régularité du développement des plantules. Les divers lots peuvent donc être comparés. Bien que cette comparaison, à un tel stade de la végétation, apparaisse quelque peu audacieuse, je le souligne, elle est néanmoins utile pour fixer des doses d'une façon qui ne soit pas trop arbitraire.

Les résultats trouvés montrent que tous les « oligo-éléments » ajoutés ont donné des excédents de récolte, leur action s'étant exercée d'ailleurs entre des limites très étroites. Les doses vraiment utiles, tout au moins au début de la végétation, paraissent bien être pour la plupart des « catalyseurs » considérés, de l'ordre de 2 à 5 mg. par kilogramme de terre sèche, chiffres cités, ainsi qu'on l'a vu précédemment, par divers auteurs.

1. Les rares débris de cotylédons vides retrouvés dans les sols ont prouvé que depuis déjà quelque temps, les plantules prélevaient leur nourriture dans le sol.

J'ai donc choisi pour les essais culturaux que je me proposais d'entreprendre ces deux doses : 2 et 5 mg. de chacun des divers « oligo-éléments » envisagés, par kilogramme de terre supposée sèche. La suite de cet exposé montrera que dans des conditions de végétation peu éloignées des conditions naturelles, ces doses paraissent bien correspondre aux plus efficaces et que leur choix était assez judicieux, bien qu'effectué, tant d'après des essais antérieurs peu comparables, qu'au moyen des expériences de germination relatées ci-dessus, satisfaisantes dans leur réalisation, mais peut-être critiquables dans leur conception.

*Nombre d'essais effectués.* — L'expérience de culture que je désirais réaliser comportant l'étude de neuf « oligo-éléments » incorporés respectivement au sol aux doses indiquées ci-dessus et nécessitant obligatoirement des témoins sans catalyseurs, il ne m'était guère possible, ne disposant pas d'une installation spéciale et d'un personnel en rapport, d'envisager un nombre important de répétitions des essais projetés. J'ai dû me contenter d'effectuer en double chacun de ceux comportant l'addition d'« oligo-élément » et d'utiliser quatre témoins, ce qui paraîtra sans doute à première vue insuffisant. Mais par la plus grande rigueur dans l'exécution, je me suis efforcé de remplacer la vérification supplémentaire qu'auraient pu m'apporter des essais plus nombreux. Il y a lieu de faire observer d'ailleurs que la précision des résultats obtenus avec la méthode de culture en vases varie beaucoup avec la nature des expériences. Elle est ordinairement d'autant meilleure que le développement de la plante cultivée a été plus vigoureux. Mais néanmoins, si cette précision est d'une façon générale supérieure à celle donnée par les essais en plein champ, il ne faut pas non plus se faire une fausse idée de son degré.

Habituellement, sont considérés comme très satisfaisants les résultats moyens calculés avec des nombres dont la variation est inférieure à 1 p. 100, satisfaisants lorsque cette dernière oscille entre 1 et 1,5 p. 100, passables quand l'écart est de l'ordre de 1,5 à 2 p. 100.

*Préparation et conduite de l'expérience définitive.* — Après ces considérations préliminaires sur le choix de la terre utilisée, l'espèce végétale cultivée, l'état et les doses des « oligo-éléments » ajoutés, le nombre d'essais effectués, considérations qu'il m'a semblé indispensable de présenter, afin de faire bien connaître les conditions de l'expérience de culture que j'ai réalisée, il ne me reste plus avant d'exposer les résultats de celle-ci qu'à indiquer les détails matériels de sa préparation et de sa conduite.

Avec la terre de l'Ecole d'Horticulture préalablement tamisée à travers un tamis à trous ronds de 2 mm., puis parfaitement homogénéisée, ainsi qu'il a été dit, et après une nouvelle détermination de l'humidité (celle-ci n'ayant d'ailleurs pas varié sensiblement pendant le séjour du sol dans la caisse où il était conservé, puisqu'elle s'élevait à 3,3 p. 100 de terre supposée

sèche au lieu de 4,0), j'ai constitué 40 lots correspondant chacun à 1 kg. 800 de terre supposée sèche. J'ai choisi ce poids de manière à opérer sur une masse de terre à la fois assez importante pour permettre le développement normal des racines des plantes cultivées et pas trop volumineuse cependant, pour que ladite terre conserve une bonne homogénéité diminuant les causes d'erreur dans les échantillonnages qui seront ultérieurement effectués. Ce poids était aussi conditionné par la capacité des vases dont je pouvais disposer, vases commodes, d'un maniement facile.

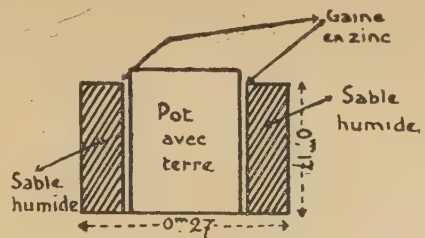
Chacun de ces lots a été transvasé dans une grande terrine et (comme dans les essais de germination qui constituaient une réduction de cette expérience de culture à son début) porté par addition d'eau redistillée dans un appareil en verre, à l'humidité fixée de 30 p. 100 de terre sèche. De même que dans les petits essais préliminaires, avec l'eau nécessaire à l'humidification a été ajouté à l'état de dissolution (ou de suspension dans le cas du plomb) le sel pur apportant au sol, à la dose soit de 2 mg., soit de 5 mg. par kilogramme de terre sèche, l'élément dont l'influence devait être examinée. Ainsi qu'il a été dit précédemment, le bore, le fluor, l'arsenic, l'iode, le chrome ont été introduits respectivement sous forme de borate, fluorure, arsénite, iodure, chromate de sodium. Le manganèse, le cuivre, le zinc, le plomb ont été incorporés à l'état de sulfates.

Après homogénéisation effectuée avec toutes les précautions nécessaires pour éviter les pertes et le transport par les mains ou les instruments de toute trace d'élément en expérience d'un sol dans un autre, chaque lot (témoin ou pourvu de sa dose respective d'oligo-élément) correspondant à 2 kg. 340 de terre humide et *bien meuble* a été introduit dans un pot en grès blanc, vernissé, préalablement taré. (La tare était, dans un but de simplification, la même pour tous les pots. Le poids de chacun de ces derniers était amené à celui du récipient le plus lourd par l'addition de petits morceaux de silex parfaitement propres.) Les dimensions de chaque pot (diamètre intérieur 14 cm. 5, hauteur 18 cm.) convenaient parfaitement pour la culture envisagée ; elles étaient suffisantes pour permettre le bon développement de la variété choisie.

Le 6 avril 1939, j'ai réparti dans chaque pot ainsi préparé et à une profondeur constante (5 mm.) 8 graines de pois nain très hâtif d'Annonay (Vilmorin-Andrieux) d'aspect identique, de même grosseur et à très peu près de même poids. Ce dernier oscillait en effet pour chaque graine semée entre 0 g. 224 et 0 g. 226. Après le semis, les 40 récipients ont été couverts respectivement avec une plaque de verre, de façon à éviter toute dessiccation, et abandonnés à l'abri de tout apport extérieur dans une pièce dont la température était de 24°.

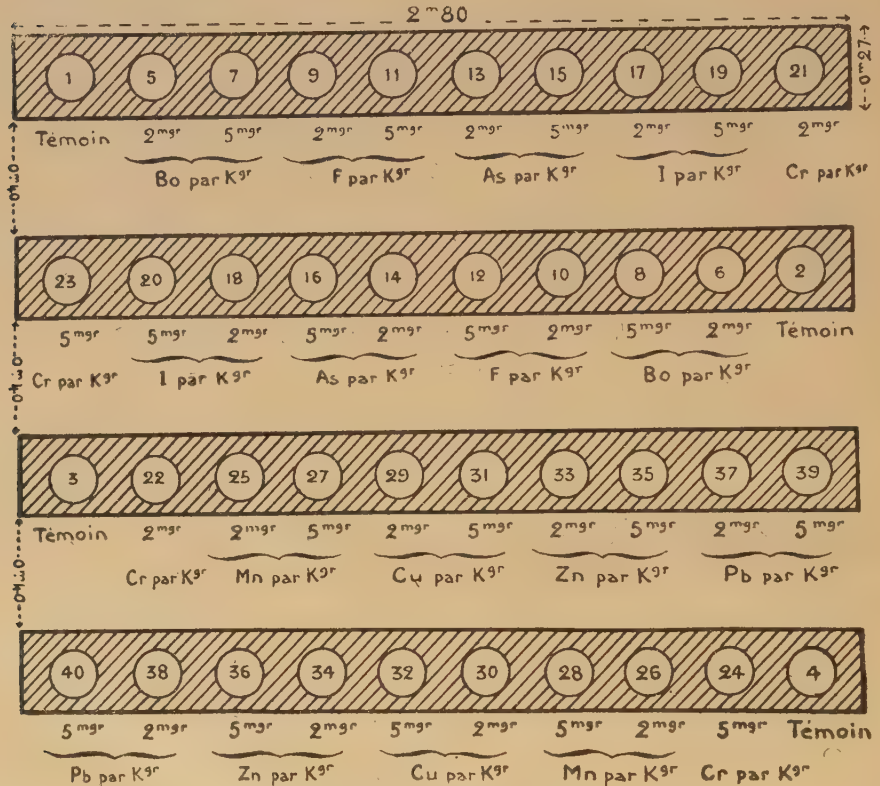
Le 13 avril 1939, j'ai constaté que la germination s'était effectuée normalement *dans tous les lots*. Dans le plus grand nombre 8 graines avaient germé, dans les autres seulement 7. J'ai ramené partout le nombre de plantes à 7, en enlevant avec précaution là où c'était nécessaire la graine germée en excédent. *Ce nombre, fait exceptionnel, a pu être maintenu partout sans changement, jusqu'à la fin de l'expérience.*

A cette date du 13 avril 1939, les 40 pots découverts ont été placés à l'air libre sur la terrasse formant le toit du laboratoire. Ils ont été répartis, selon le plan figuré ci-après, dans 4 grandes caisses en bois de chacune 2 m. 80 de longueur, 0 m. 27 de largeur et 0 m. 17 de profondeur où avaient été disposées des gaines en zinc (10 par caisse) entourées de sable humide. Chaque récipient a été introduit dans une de ces alvéoles ainsi réalisées dont le diamètre était tel que l'espace libre se trouvait réduit au minimum entre ce récipient et son étui. Le contenu des vases



COUPE D'UNE CAISSE

demeurait ainsi à l'abri d'une grande dessiccation. (Sa température n'étant pas de cette manière influencée par la radiation solaire ou la température de l'air, restera voisine de celle observée généralement dans le sol). Entre chaque caisse, une allée de 0 m. 40 de large permettait d'effectuer les manipulations nécessaires et en outre assurait un bon éclairage, sensiblement identique, des différents lots.



DISPOSITION GÉNÉRALE (Plan)

Seuls, ainsi qu'on le verra sur le plan ci-dessus, les témoins par la place que je leur ai volontairement assignée ont peut-être, à ce point de vue de l'éclairage, été tous légèrement favorisés, mais c'est là chose normale dans une expérience de culture.

Les photographies annexées donneront d'ailleurs une idée plus réelle de la disposition générale adoptée.

Pendant toute la durée de la végétation qui a été extrêmement régulière, l'humidité initiale du sol, 30 p. 100 de terre supposée sèche, a été maintenue dans tous les pots : 1° par l'eau de pluie comme dans les conditions naturelles (vu l'ampleur de l'expérience, il m'était difficile, sans une installation spéciale importante, d'opérer sous un toit vitré, à l'abri des précipitations atmosphériques ; sans doute, en cas de pluie abondante, la capacité maximum du sol pour l'eau pouvait être dépassée et les plantes risquaient d'être « noyées », mais fort heureusement, cet accident très grave ne s'est pas produit) ; 2° par des arrosages fréquents (parfois 2 par jour, matin et soir, pendant les périodes d'évaporation intense) faits soigneusement à l'eau bi-distillée et contrôlés par la pesée. (Au moment où les plantes

commençaient à prendre un certain développement, des témoins spéciaux sans culture ont permis de tenir compte avec une approximation suffisante du poids de ces plantes dans la quantité d'eau à rajouter, lors desdits arrosages, pour rétablir l'humidité primitive.)

Des « affolants » en aluminium, installés à proximité des pots, éloignaient les oiseaux qui, d'ailleurs, étaient rares.

Le 5 mai, et bien que la variété de pois cultivée fût une variété naine, il a été nécessaire de maintenir la verticalité des plantes au moyen de tuteurs. Ces derniers, en bambou, ont été amenés pour tous les lots à un poids uniforme, afin de n'apporter aucun trouble, lorsque la perte d'eau de ces lots était compensée.

La floraison s'est produite dans tous les pots entre le 24 et le 26 mai ; les premières gousses sont apparues le 31 mai.

Le 10 juin, afin de fixer l'état des plantes complètement développées et arrivées presque au terme de leur végétation, j'ai photographié chaque groupe de pots correspondant à un oligo-élément déterminé ainsi que les lots-témoins. L'examen de quelques-unes de ces photographies reproduites ci-après confirmera, s'il en est besoin, les résultats numériques obtenus dont il va être bientôt question. Le papier millimétrique servant de fond à ces vues, permettra de se rendre compte des dimensions des plantes à la fin de leur développement.

Le 26 juin, les graines étant complètement mûres, j'ai effectué d'abord la récolte des parties aériennes (à peu près sèches) des plantes de chaque lot. Avec les plus grandes précautions, j'ai extrait ensuite, de chaque sol resté très meuble, les racines existantes afin de les examiner ultérieurement. Les graines, les gousses vidées et les tiges avec les feuilles qu'elles portaient ont été séparées, séchées à l'étuve à  $+ 100-105^{\circ}$  jusqu'à poids constant.

## RÉSULTATS OBTENUS

Ces derniers sont groupés en deux tableaux I et II ci-après qui indiquent :

I) En grammes, les poids de matières sèches récoltées sur les quatre pots-témoins et le poids *moyen* de celles récoltées sur chaque pot ayant reçu une dose donnée (2 mg. ou 5 mg. par kilogramme de terre supposée sèche) d'un « oligo-élément ». (Les écarts entre les essais identiques ont été de l'ordre de 1 à 1,5 p. 100, ce qui est satisfaisant dans une expérience de cette nature).

II) Les indices de comparaison exprimant ce poids moyen de matières sèches (ensemble des parties aériennes) obtenu avec chaque dose de catalyseur par rapport à celui fourni par un témoin représenté par le nombre 100.

TABLEAU I

| Poids des récoltes (parties aériennes)                         |                           |                        |                      |              |                                            |       |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------------------|-------|
| (4 essais témoins ; 2 essais pour chaque dose d'oligo-élément) |                           |                        |                      |              |                                            |       |
|                                                                | A<br>TIGES<br>ET FEUILLES | B<br>GOUSSSES<br>VIDES | POIDS<br>DE<br>A + B | C<br>GRAINES | POIDS DE LA<br>RÉCOLTE TOTALE<br>A + B + C |       |
|                                                                | g.                        | g.                     | g.                   | g.           | g.                                         |       |
| Témoins                                                        | 1° . . . .                | 2,588                  | 0,659                | 3,247        | 2,290                                      | 5,537 |
|                                                                | 2° . . . .                | 2,601                  | 0,665                | 3,266        | 2,255                                      | 5,521 |
|                                                                | 3° . . . .                | 2,593                  | 0,660                | 3,253        | 2,250                                      | 5,503 |
|                                                                | 4° . . . .                | 2,580                  | 0,671                | 3,251        | 2,277                                      | 5,528 |
|                                                                | moyenne                   | 2,590                  | 0,664                | 3,254        | 2,268                                      | 5,522 |
| Par kg. de terre supposée sèche                                |                           |                        |                      |              |                                            |       |
| Bo                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,627                  | 0,707                | 3,334        | 2,492                                      | 5,826 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,628                  | 0,644                | 3,272        | 2,263                                      | 5,535 |
| F                                                              | 2 mg. . . . .             | 2,577                  | 0,737                | 3,314        | 2,610                                      | 5,924 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,666                  | 0,727                | 3,393        | 2,539                                      | 5,932 |
| As                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,619                  | 0,727                | 3,346        | 2,265                                      | 5,611 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,800                  | 0,690                | 3,490        | 2,501                                      | 5,991 |
| I                                                              | 2 mg. . . . .             | 2,700                  | 0,731                | 3,431        | 2,540                                      | 5,971 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,792                  | 0,779                | 3,571        | 2,475                                      | 6,046 |
| Cr                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,760                  | 0,740                | 3,500        | 2,777                                      | 6,277 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,707                  | 0,682                | 3,389        | 2,385                                      | 5,774 |
| Mn                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,628                  | 0,692                | 3,320        | 2,421                                      | 5,741 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,793                  | 0,760                | 3,553        | 2,115                                      | 5,668 |
| Cu                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,746                  | 0,767                | 3,513        | 2,475                                      | 5,988 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,414                  | 0,779                | 3,193        | 2,478                                      | 5,671 |
| Zn                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,585                  | 0,783                | 3,368        | 2,185                                      | 5,553 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,635                  | 0,794                | 3,429        | 2,812                                      | 6,241 |
| Pb                                                             | 2 mg. . . . .             | 2,419                  | 0,689                | 3,108        | 2,230                                      | 5,338 |
|                                                                | 5 mg. . . . .             | 2,292                  | 0,627                | 2,919        | 2,432                                      | 5,351 |

TABLEAU II

**Indices de comparaison**  
(pour A + B + C)

Témoin = 100 (moyenne de 4 essais)

|              | Après addition de | 2 mg.              | 5 mg.              | par kg. de terre<br>supposée sèche |
|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| Bo . . . . . |                   | 105,5 <sup>1</sup> | 100,2 <sup>1</sup> |                                    |
| F. . . . .   |                   | 107,2              | 107,4              |                                    |
| As. . . . .  |                   | 101,6              | 108,4              |                                    |
| I. . . . .   |                   | 108,1              | 109,4              |                                    |
| Cr . . . . . |                   | 113,6              | 104,5              |                                    |
| Mn. . . . .  |                   | 103,9              | 102,6              |                                    |
| Cu . . . . . |                   | 108,4              | 102,6              |                                    |
| Zn . . . . . |                   | 100,5              | 113,0              |                                    |
| Pb . . . . . |                   | 96,6               | 96,9               |                                    |

1. Pour chaque dose, moyenne de 2 essais.

## CONCLUSIONS

L'examen de ces résultats montre que dans tous les cas, sauf un, les « oligo-éléments » ajoutés ont produit par rapport au témoin un excédent de matière végétale. Seul le plomb, contrairement à la plupart des observations antérieures relatées précédemment, a eu plutôt un effet dépressif. Peut-être le pois manifeste-t-il une sensibilité particulière à l'égard de ce métal. Je rappelle que M. C. HOOPER [649] avait également constaté un effet toxique du sulfate de plomb sur les Légumineuses, mais que celui-ci était relativement faible, comme dans mon expérience d'ailleurs.

Cet excédent de récolte que j'ai obtenu avec les « oligo-éléments » considérés, en dehors du plomb, a été très variable puisqu'il a oscillé entre 2,6 et 13 p. 100 (je néglige volontairement les très petites augmentations constatées avec 5 mg. Bo, 2 mg. As et 2 mg. Zn par kilogramme de sol). En général, l'action favorable s'est manifestée sur toutes les parties de la récolte. Parfois, cependant, ainsi qu'on peut le remarquer sur le tableau I, elle s'est exercée plutôt sur le développement de la graine. C'est le cas du bore (2 mg.) dont l'heureux effet à petites doses a souvent été constaté, on l'a vu précédemment, tant sur les Légumineuses, en général (W. E. BRENCHLEY, K. WARINGTON, etc...) [88, 89] que sur la production des graines d'autres plantes comme l'orge, le millet (W. SCHROPP et B. ARENZ [128]) ou le lin (E. V. BOBKO et V. V. ZERLING [133]). C'est aussi le cas du fluor pour chacune des quantités ajoutées, du manganèse (2 mg.) et surtout du zinc à la dose de 5 mg. par kilogramme de terre sèche. Est-il bien nécessaire de rappeler, à ce propos, les expériences classiques de A. GAUTIER et P. CLAUSMANN [243 a, b] avec le fluor, de G. BERTRAND et L. THOMASSIN [337] avec le manganèse, citées dans la revue des travaux antérieurs, expériences montrant soit pour le blé, soit pour l'avoine, l'heureuse influence des dits « oligo-éléments » sur le rendement en grain de ces deux céréales.

La quantité d'« oligo-élément » ajoutée a eu, on peut le voir également et comme il fallait s'y attendre d'après les recherches des auteurs qui m'ont précédé, une influence considérable sur la récolte totale ou sur différentes parties de cette dernière. Cette influence s'est manifestée souvent entre des limites très étroites : une addition de 2 mg. de bore (par kilogramme de terre sèche) a eu un heureux effet, une dose de 5 mg. a exercé une action plutôt dépressive par rapport à la précédente ; un apport de 2 mg. de zinc a eu peu d'effet, 5 mg., au contraire, ont favorisé très nettement le développement des graines ; l'action de 2 mg. de cuivre a été particulièrement favorable alors que celle de 5 mg. s'est révélée très néfaste pour le développement des tiges et feuilles, ainsi que le montrent à la fois le poids trouvé figurant sur le tableau I et la photographie des plantes faite peu avant la récolte (planche V). En ce qui concerne cette influence utile du cuivre à petite dose, il y a lieu d'ailleurs de

ne pas oublier que le sol dans lequel ce métal a été incorporé contenait une proportion notable de matière organique et l'on rapprochera ce résultat favorable de ceux obtenus par d'autres chercheurs sur des sols de nature un peu analogue, résultats signalés dans la bibliographie.

*Ces constatations sur l'action de la quantité ajoutée ne sont valables bien entendu, dans mon expérience que pour chaque « oligo-élément » pris individuellement.* Si l'on voulait établir une comparaison absolue entre les doses des divers éléments considérés, il y aurait lieu de tenir compte évidemment de la masse atomique et de la valence de ces derniers. J'ai dit au début de cet exposé concernant mes recherches personnelles pourquoi j'avais renoncé à cette comparaison absolue que j'avais d'abord envisagée.

Ainsi, bien qu'elle se rapporte à un cas particulier, le développement d'une Légumineuse, l'expérience qui vient d'être décrite, expérience réduite, mais que je me suis efforcé de réaliser avec beaucoup de rigueur, montre s'il en est encore besoin après les travaux de Gabriel BERTRAND et de ceux qui l'ont suivi, travaux nombreux et importants que j'ai tenu à évoquer dans ce Mémoire au risque de l'alourdir, elle montre dis-je, le grand intérêt que présentent pour la nutrition végétale certains « oligo-éléments ». Si elle confirme l'utilité aujourd'hui indiscutablement admise pour cette nutrition d'éléments tels que le manganèse ou le bore, elle attire en même temps et de nouveau l'attention sur l'action exercée par des « catalyseurs » bien moins connus mais dont l'importance avait été il y a déjà longtemps pressentie, tels le zinc étudié naguère par M. JAVILLIER, puis P. MAZÉ, notamment, ou le fluor dont le rôle biochimique a été particulièrement mis en évidence par A. GAUTIER et P. CLAUSMANN. Cette expérience montre en outre que l'influence sur la production d'une récolte d'éléments tels l'arsenic, l'iode, le chrome, le cuivre et même le plomb, envisagée jusqu'ici assez accessoirement, mérite d'être examinée plus attentivement, certains résultats trouvés antérieurement et les miens faisant apparaître celle-ci non négligeable.

*Cependant, malgré les conclusions fort encourageantes de cette expérience de culture dont la réalisation me semblait particulièrement utile pour étudier avec précision l'action, pour certains encore controversée, de divers « oligo-éléments » sur le développement d'une plante dans des conditions voisines des conditions naturelles, l'utilisation agricole de ces derniers implique encore de nombreux essais surtout en plein champ, dans lesquels la nature des sols, les espèces végétales cultivées et les doses de « catalyseurs » expérimentées seraient variées dans la plus large mesure.*

*De plus, le mécanisme de l'intervention de ces « oligo-éléments » dans la nutrition de la plante aura besoin d'être précisé, comme commence à l'être celui du phosphore et du potassium.*

Lorsque ces « oligo-éléments » sont initialement présents dans le sol, comment pénètrent-ils en effet dans le végétal et sous quelle forme ? Lorsqu'ils sont ajoutés audit sol, que deviennent-ils dans

celui-ci ? Questions importantes auxquelles il est encore difficile de donner une réponse.

La détermination de la fraction assimilable est liée, je l'ai dit précédemment, au perfectionnement des techniques analytiques. La précision des méthodes conditionne également l'étude des mouvements de ces substances dans le sol et dans la plante. En ce qui concerne cette dernière de nombreux faits sont cependant déjà acquis, grâce surtout aux travaux de G. BERTRAND et de son Ecole, mais en ce qui touche les rapports des « oligo-éléments » avec le sol, les connaissances sont bien moins étendues. Elles progressent néanmoins et déjà les relations entre ces derniers et le complexe absorbant de la terre arable ont été quelque peu étudiées.

C. ANTONIANI [730] (1927) a montré que les acides arsénieux et arsénique se comportaient comme l'acide phosphorique et étaient fixés comme ce dernier par le sol, mais moins énergiquement. C. Brioux et E. Jouis [731] (1935), F. M. EATON et L. V. WILCOX [732] (1939) ont fait la même constatation en ce qui concerne le bore qui serait aussi partiellement fixé. Par contre, E. V. BOBKO, T. V. MATVEA, T. D. DOUBACHOVA et A. I. PHILIPPOV [733] (1936) n'ont pas observé cette fixation et pour ces auteurs le bore serait sur la surface terrestre un élément instable et non typique de celle-ci. J. A. NAFTEL [734] (1938) a remarqué que dans les sols acides et fortement lessivés la correction de l'acidité par le chaulage rendait le bore inassimilable par les plantes. P. NOTTIN [735] (1920), puis A. QUATTAROLI [736] (1927) ont constaté la fixation par les colloïdes du sol du manganèse soluble introduit dans celui-ci. K. KRUMINS [714] (1931) a montré la relation étroite existant entre le pH du sol et la teneur en manganèse échangeable : la quantité de ce dernier augmente avec l'acidité, mais elle diminue aussi par le chaulage du sol (L. G. WILLIS [737] (1932), A. L. PRINCE et S. J. TOTH [738] (1938)). On connaît d'autre part, depuis longtemps la faculté de rétention extrêmement puissante de la terre pour le cuivre, d'où le comportement différent de ce métal sur les plantes cultivées sur un sol et sur celles développées en milieu aqueux (L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY [528] (1921)). Des quantités considérables de zinc peuvent être aussi absorbées par le sol (E. R. PURVIS et R. W. RUPRECHT [739] (1934)). Cependant, d'après H. W. JONES, O. E. GALL et R. M. BARNETTE [632] (1936), si l'on applique des sels solubles de zinc à un sol, une certaine quantité seulement se transforme en composés insolubles et à condition que les solutions soient assez concentrées. Une partie de l'autre fraction peut conserver soit son état initial, soit se lier au complexe colloïdal du sol sous forme de zinc échangeable. Les proportions de ces trois formes sont évidemment sous l'influence de la teneur en matières organiques, en argile, en bases échangeables, en carbonates et aussi en phosphates du sol, la forme insoluble prédominant dans les sols tourbeux, calcaires ou ayant reçu des superphosphates.

Ces données sont néanmoins insuffisantes et la « mécanique chimique » des « oligo-éléments » nécessitera encore bien des études, celles-ci s'avérant d'ailleurs particulièrement délicates du fait des petites quantités mises en œuvre. Dans ce domaine, un vaste champ d'investigation se présente donc aux chercheurs lorsqu'ils disposeront de méthodes assez fines pour saisir le détail des réactions qui s'accomplissent. Une meilleure connaissance de ces dernières complétant les essais culturaux préconisés ci-dessus permettra d'envisager alors de façon vraiment logique l'emploi des « oligo-éléments » en agriculture.

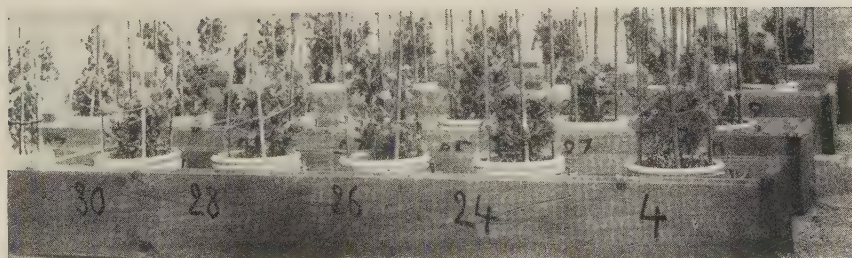


## DISPOSITION GÉNÉRALE DE L'EXPÉRIENCE DE CULTURE

---



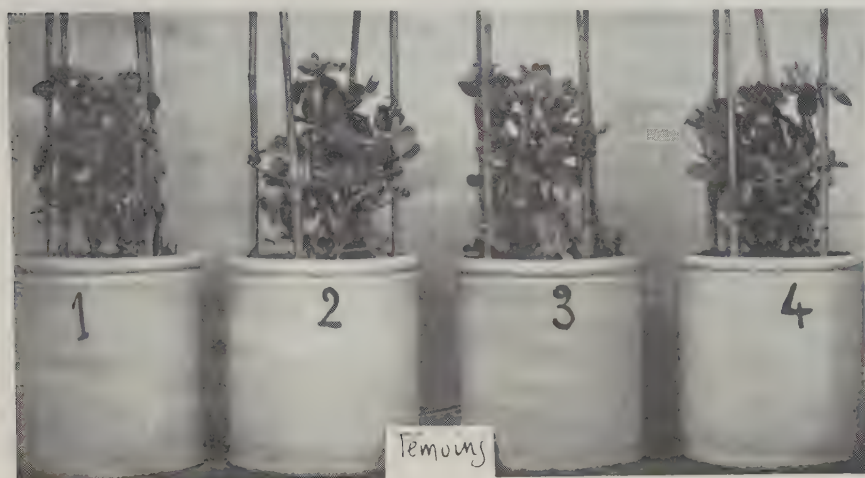
A. — ENSEMBLE



B. — DÉTAILS



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 (2 ET 5 MGR. PAR KGR. DE TERRE SUPPOSÉE SÈCHE)  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*parties aériennes*)



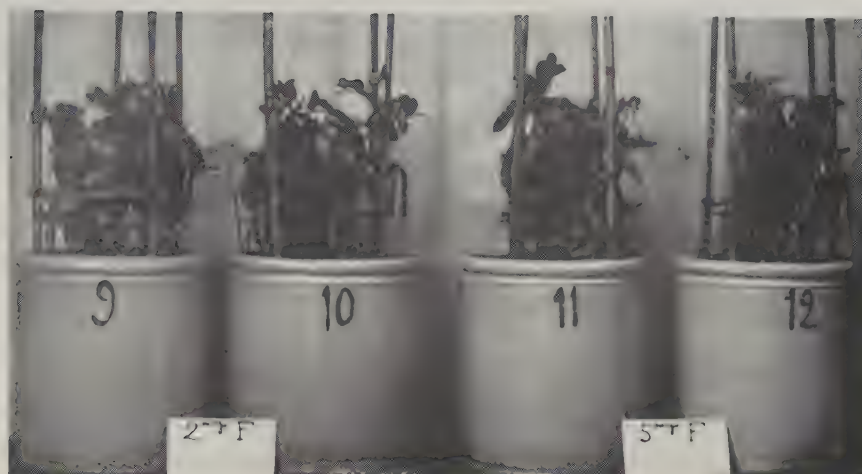
A. — TÉMOINS



B. — Boré.



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*parties aériennes*)  
 (suite)



C. — FLUOR



D. — ARSENIC



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*parties aériennes*)  
 (suite)



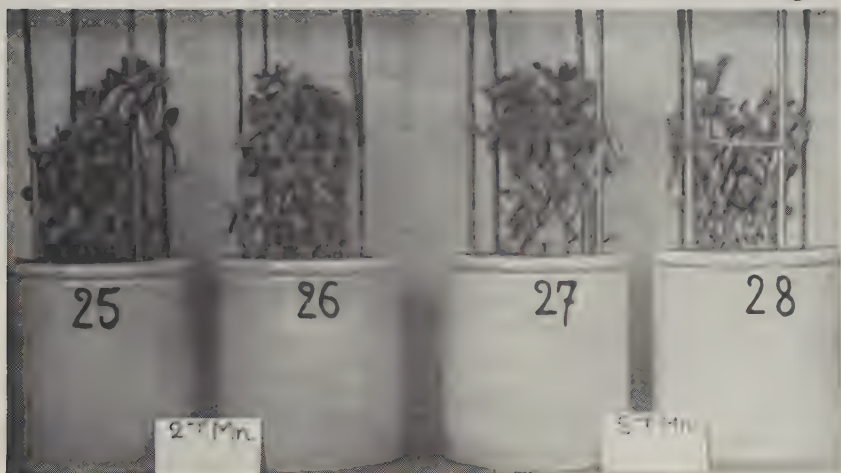
E. — IODE



F. — CHROME



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*parties aériennes*)  
 (suite)



G. — MANGANÈSE



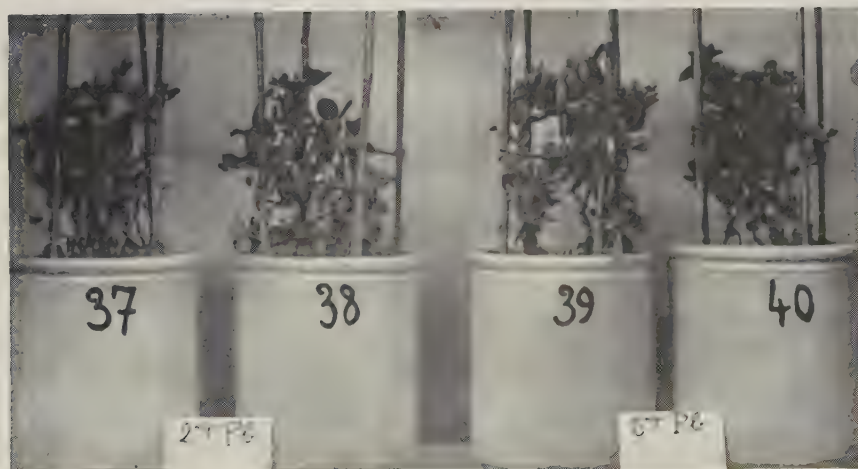
H. — CUIVRE



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*parties aériennes*)  
 (fin)



I. — ZINC



J. — PLOMB



*DEUXIÈME PARTIE*

---

« OLIGO-ÉLÉMENTS »  
ET QUALITÉ DES RÉCOLTES

---



## DEUXIÈME PARTIE

---

### « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET QUALITÉ DES RÉCOLTES

---

L'agriculteur, l'horticulteur et, en général, ceux qui cherchent à produire de la matière végétale dans un but utilitaire bien déterminé doivent se préoccuper non seulement du rendement pondéral mais aussi de la « qualité » des récoltes.

Cette « qualité » est, d'ailleurs, une particularité assez difficile à définir, du fait qu'elle n'apparaît pas comme un caractère intangible, immuable et qu'elle peut même présenter des aspects très divers en raison de la variété des éléments qui interviennent dans son appréciation. On peut tout juste dire que la qualité est une propriété ou un ensemble de propriétés qui confère à une espèce végétale cultivée une valeur particulière.

C'est ainsi qu'elle représentera la valeur nutritive pour les aliments de l'homme et des animaux, elle exprimera la valeur industrielle pour les plantes d'où l'on extrait le sucre, l'amidon, la cellulose, la matière grasse, des huiles essentielles, des alcaloïdes ou même des vitamines ; elle pourra correspondre à une valeur culinaire, à un aspect, une saveur, un arôme notamment pour les productions maraîchères et fruitières ; elle pourra encore traduire certaines aptitudes : aptitude à la panification (blé), à la germination (orge de brasserie), « filabilité » (lin), combustibilité (tabac).

La qualité dépend étroitement de facteurs climatiques et génétiques dont le rôle respectif a été étudié ou très opportunément rappelé, il y a peu d'années, par H. GESLIN [740] et R. DIEHL [741] (1935). Mais quelles sont ses relations avec les facteurs chimiques qui me retiendront plus spécialement ? G. GUYON [742] (1935), H. BURGEVIN [743] (1938), après analyse de nombreux travaux concernant l'influence des engrais sur la qualité des produits agricoles, estiment que cette dernière n'est pas sensiblement modifiée par l'apport au sol d'une fumure bien composée. « Quand l'alimentation de la plante est convenablement réglée, il s'établit entre l'action des éléments fertilisants un heureux équilibre d'où résultent un développement normal de la plante et une récolte de bonne qualité » (H. BURGEVIN [743]). M. JAVILLIER et O. GAUDIN [744] (1938), envisageant dans une revue très détaillée le point de vue plus particulier de l'influence des engrais chimiques sur la production des principes immédiats de haute activité physiologique, aboutissent à

une conclusion à peu près analogue, mais jugent néanmoins que les recherches doivent être poursuivies.

Les travaux examinés par ces différents auteurs se rapportent essentiellement aux éléments fertilisants usuels, c'est-à-dire à l'azote, au phosphore, au potassium ; le calcium, le magnésium, le manganèse n'y sont évoqués qu'incidemment.

Les « oligo-éléments » exercent-ils une action sur la « qualité » des récoltes ? Cette question posée par les travaux de Gabriel BERTRAND et de ses élèves a préoccupé de nombreux chercheurs. Je me la suis posée moi-même au cours de l'expérience de culture décrite précédemment. Avant d'y répondre pour le cas particulier que j'ai envisagé, il me semble utile de rappeler brièvement les plus importants résultats obtenus antérieurement avec les « oligo-éléments » étudiés dans mon expérience : bore, fluor, arsenic, iode, chrome, manganèse, cuivre, zinc, plomb, ces résultats se rapportant à des cas très variés.

## I

### TRAVAUX ANTÉRIEURS

Comme mes expériences personnelles sur le sujet, beaucoup de travaux antérieurs concernant l'influence des « oligo-éléments » sur la « qualité » des récoltes ont souvent été effectués concurremment avec ceux se rapportant à l'influence des mêmes « catalyseurs » sur le rendement pondéral desdites récoltes. On retrouvera donc dans la revue qui va être faite ci-après des noms d'auteurs déjà cités précédemment.

Le bore a fait l'objet d'un nombre considérable d'essais. Il a été reconnu indispensable à la croissance de la tomate (E. S. JOHNSTON et W. H. DORE [152] (1928)) dont il favorise le développement et la multiplication des fruits (E. S. JOHNSTON et P. L. FISCHER [153] (1930)). Mais c'est surtout sur la betterave à sucre que son influence heureuse s'est souvent manifestée. A la suite des travaux de E. BRANDENBURG [166, 167] (1931-32) qui, outre l'effet du bore sur le rendement pondéral, la relation entre l'absence de cet élément et la « maladie du cœur », montraient également l'influence du métal-loïde sur la richesse saccharine de la racine, une multitude d'expériences ont été effectuées dans lesquelles les auteurs ont envisagé en même temps ces divers aspects de l'action de « l'oligo-élément ». Je rappellerai seulement celles de grande envergure exécutées par K. MEYER-HERMANN [173] (1933-36) sous le contrôle de l'Institut de recherches agricoles de Harleshausen, en Allemagne, puis celles de O. KAUFMANN [174] (1934) qui continua à la ferme Wernersdorf, en Silésie, l'œuvre de BRANDENBURG ; celles de DE HAAN [175] (1934) à l'Institut de culture des betteraves sucrières de Bergen-op-Zoom, en Hollande, de E. V. BOBKO et A. BELVOUSSOV [172] (1933) à l'Institut central de sucrerie de Moscou. Tous ces auteurs constatèrent une élévation souvent notable de la teneur en sucre de la betterave, du fait de l'addition au sol d'une petite quantité de borax de l'ordre de 10 à 15 kg. par hectare. Par contre, dans les essais effectués en France, cette élévation n'a pas été confirmée (C. BRIOUX et E. JOUIS [745], G. JORET et H. MAL-

TERRE [746] (1936-38)). Ces derniers auteurs observèrent, cependant, dans une autre expérience [746 a] (1937) une très légère augmentation de la densité du jus.

K. SCHARRER et W. SCHROPP [747] (1934), incorporant le bore au sol sous forme d'acide borique, trouvèrent plus de sucre dans les betteraves et plus de fécule dans les pommes de terre, pour les lots ayant reçu l'oligo-élément. O. SMITH et L. B. NASH [748] (1937), considérant la qualité culinaire, ont observé que des tubercules de pomme de terre provenant de champs ayant reçu 25 kg. de borax à l'hectare, se sont montrés à la cuisson très supérieurs à ceux originaires d'un champ n'ayant pas reçu de bore.

Dans les expériences de A. NOWOTNOWNA [114 a] (1934) sur le soja, le bore a augmenté la teneur en matière grasse des graines de cette plante.

Si l'action du *fluor* et de l'*arsenic* sur le développement des plantes a été étudiée par quelques auteurs, la littérature agronomique ne possède guère de références concernant les rapports de ces éléments avec la qualité des récoltes.

L'*iode*, appliqué sur des sols sous forme d'iodure de potassium, a diminué la richesse en sucre des betteraves sucrières dans les expériences de J. STOKLASA [296] (1924), de E. UNGERER [297] (1925) et de R. VON VEGESACH [308] (1937). Mais ce dernier a constaté qu'une dose de 4 à 6 kg. d'iode par hectare donnait aux tissus du lin une finesse particulière et augmentait la masse fibreuse de la plante de 8 p. 100 par rapport aux témoins.

I. K. ONISHCHENKO et P. A. VLASYUK [749] (1934) dans des études au laboratoire et au champ sur la stimulation chimique de la croissance des betteraves par le traitement préliminaire de leurs semences avec des solutions de différents sels à des concentrations variées, ont observé le maximum d'effet avec les sels de *chrome* et de *manganèse* qui ont augmenté en même temps le poids des racines (1.500 kg. environ par hectare) et le sucre contenu dans ces dernières (de 0,1 à 0,2 p. 100).

Les relations du *manganèse* avec la qualité des récoltes ont fait l'objet de nombreux travaux. Gabriel BERTRAND dans une conférence sur « les Engrais catalytiques et la culture de la betterave », faite le 4 avril 1910 [708], a cité des expériences de C. V. GAROLA et de J. STOKLASA sur cette plante. Le premier de ces auteurs, effectuant en 1907 des essais en cases de végétation, a obtenu avec une dose de 3 g. 5 de Mn (à l'état de sulfate) par mètre carré une augmentation de la richesse en sucre de la racine. Le second, opérant dans les conditions de la grande culture, s'il a trouvé qu'un apport de sulfate de manganèse (25, 50 kg. par hectare) élevait de façon sensible le poids de sucre de la récolte totale, du fait de l'augmentation du rendement, n'a pas observé de variation notable dans le sucre p. 100 de racines.

Bien que L. P. MILLER [750] (1933) estime que le manganèse joue un rôle important dans la formation du sucre et son métabolisme soit directement, soit indirectement, les résultats qu'il a obtenus en ce qui concerne l'influence de cet élément sur la richesse saccharine ont été souvent contradictoires. Si le manganèse a légèrement accru cette richesse dans les expériences de A. GRÉGOIRE, A. I. HENDRICK et E. CARPIAUX [350] (1907) et de C. DUSSEY [751] (1913), son influence favorable ne s'est guère manifestée dans celles de O. MUNERATI, G. MEZZADROLI et T. V. ZAPPAROLI [458] (1914), de O. FALLADA et J. K. GREISENEGGER [374, 752] (1915-17), K. ULRICH [753] (1917). K. DE HAAN [754] (1934) constate que le sulfate de manganèse a augmenté de 1.000 kg. par hectare la quantité de sucre des betteraves, mais il ne précise pas si cette augmentation est en relation avec le rendement pondéral ou si elle concerne la richesse même de la racine.

P. E. TURNER [755] (1933) a observé que le jus de la canne à sucre avait une pureté plus élevée lorsqu'il provenait des plantes développées sur les sols contenant les plus forts pourcentages en manganèse.

Mn ne semble pas avoir d'effet apparent sur le taux de fécule de la pomme de terre, d'après A. GRÉGOIRE, A. I. HENDRICK et E. CARPIAUX [350], C. DUSSEY [751] ; dans les expériences de S. SIFFERT [756] (1915) il l'a abaissé, mais a élevé le poids de la récolte et la quantité d'azote contenue dans cette dernière. Sur le blé, cultivé en pots, il a augmenté à la fois la grosseur du grain et la richesse en azote de celui-ci (J. S. Mc HARGUE [380] (1919)).

Sur le soja, par contre, il n'a produit aucun effet tant sur la teneur en matière protéique que sur celle en matière grasse de la graine (C. F. FELLERS [757] (1918). Il n'a guère modifié non plus la teneur en azote des graines de maïs (L. THÉRON [758] (1935)).

Expérimentant sur l'orge de brasserie, DELORME [759] n'a pas trouvé d'excédent de rendement avec le sulfate de manganèse, mais il a obtenu un grain plus gros, plus nourri, plus blanc, ce qui est une qualité pour cette orge.

Le sulfate de manganèse augmente le poids du raisin et le rendement en moût (J. LABERGERIE [367 a] (1913), S. CETTOLINI [760] (1915)) mais il diminue parfois le sucre (F. A. SANNINO et A. TOSATTI) [761] (1913). Selon ces trois derniers auteurs, il paraît exercer aussi une influence sur la couleur et l'odeur du vin.

Appliqué sur les sols de Floride, il a augmenté à la fois le poids des oranges, leur fermeté, l'intensité de la couleur de leur écorce (W. R. ROY [762] (1937)), mais il a diminué le pourcentage de jus dans les fruits mûrs et a été sans influence sur le degré d'acidité de ce dernier dans les essais de J. J. SKINNER, G. M. BAHR et A. E. HUGHES [763] (1934).

En petite quantité, Mn a favorisé le développement de l'abricot (J. RAY et G. PRADIER [764] (1909)), de la tomate (O. S. SCHREINER et P. R. DAWSON [381] (1927)) et augmenté la grosseur de ces fruits en même temps que leur valeur commerciale. Dans les expériences de H. BARTMANN [359] (1910), il a amélioré la qualité des navets, des pois, des haricots, celle des pois, des poireaux et des artichauts dans les essais de J. BORDAS et L. THÉRON [765] (1934-35), cette qualité étant aussi exprimée par la plus-value commerciale.

Dans un autre ordre d'idées, le sulfate de manganèse, s'il ne paraît pas avoir favorisé la croissance de la digitale, a intensifié son action physiologique (G. KOCH et J. R. BUTLER [766] (1919)). Il a élevé la teneur en alcaloïdes du lupin (A. GUILLAUME [767] (1928)).

En 1895, Aimé GIRARD [504] s'était demandé si l'accumulation dans le sol du sulfate de cuivre employé comme fongicide ne modifiait pas la teneur en sucre de la betterave ou en amidon de la pomme de terre. Il constata que les betteraves ayant reçu du cuivre contenaient 15,04 p. 100 de sucre et celles des lots-témoins 14,15.

D. A. VAN SCHREVEN [768] (1936), comparant, lui, la croissance de betteraves à sucre cultivées dans les mêmes solutions nutritives avec ou sans cuivre, trouva que dans celles contenant du cuivre les betteraves étaient trois fois plus hautes avec une richesse saccharine de 16,85 p. 100 contre 15,2 dans les solutions privées de cet élément.

En ce qui concerne la pomme de terre, Aimé GIRARD n'observa aucune différence entre le taux de fécule des tubercules ayant été en contact avec du sulfate de cuivre et ceux qui en avaient été préservés. F. C. STEWART, H. J. EUSTACE et F. A. SIRRINE [483] (1903), B. F. LUTMAN [769] (1911), C. D. WOODS [770] (1919), F. C. COOK [771] (1923) constatèrent, par contre, une élévation de ce taux dans les pommes de terre ayant reçu du cuivre. Ce dernier auteur ainsi que E. O. MADER et F. M. BLODGETT [772] (1935) trouvèrent en outre dans celles-ci un plus fort pourcentage en N total.

J. E. KNOTT [773] (1931-1934), J. D. CONNER [774] (1933), R. J. MUCKENHIRN [150] (1936) remarquèrent qu'un apport de cuivre améliorerait la qualité (dureté, couleur) des oignons.

T. F. MANNS et R. RUSSELL [775] (1934), W. L. CHURCHMANN [776] (1936) notent les effets utiles du métal sur la qualité du tabac. En ce qui

concerne cette plante, W. B. TISDALE [777] (1930) trouve, notamment, que le cuivre augmente le pourcentage des feuilles de tabac ayant une couleur uniforme ainsi que la durée de combustion de ces feuilles.

K. SCHARRE et W. SCHROPP [778] (1936) ont examiné l'action du cuivre sur la composition de l'avoine. Cultivant cette plante dans des pots contenant chacun 15 kg. d'un sol constitué par 2/3 de sable et 1/3 d'argile, les auteurs ont incorporé à ce dernier, avec l'engrais de base, des doses de Cu à l'état de sulfate, variant de 0 à 25 mg. Sous l'effet de Cu (sauf dans les pots contenant 7 mg. 5 de métal), la matière protéique du grain a augmenté, la richesse maximum correspondant à une dose de 10 mg. de Cu.

Fr. BRÛNE [779] (1941) observe aussi, du fait d'un apport de cuivre à un sol de lande sableuse initialement pauvre en ce métal, une augmentation de la richesse en protéine (et un excédent de rendement) du grain des plantes, avoine et orge, cultivées sur ledit sol.

D. A. VAN SCHREVEN [625] (1937), expérimentant avec des solutions nutritives, a trouvé que les betteraves cultivées dans une solution contenant du zinc avaient une teneur en sucre deux fois élevée que celles des plantes ayant été privées de l'élément. B. A. BOURNE [780] (1937) appliquant le sulfate de zinc sur un sol tourbeux de Floride a obtenu une plus grande richesse en sucre de la canne à sucre développée sur ce sol.

Sur du soja, cultivé à la station de New-Jersey, C. R. FELLERS [757] (1918) n'a pas observé une action très nette du sulfate de zinc; si dans les graines la matière protéique paraît avoir augmenté, la matière grasse au contraire a légèrement diminué.

Depuis que W. H. CHANDLER [781, 577] (1931-32), aux Etats-Unis, a montré les effets du zinc sur les maladies dénommées « Little Leaf » ou « Rosette » des pommiers, poiriers, pruniers, etc..., et « Mottle Leaf » des *Citrus*, cet élément prend de plus en plus d'importance.

A. F. CAMP et W. REUTHER [782] (1935), en Floride, ont observé que le sulfate de zinc améliorait l'aspect des citrons et augmentait les quantités de jus et d'acide contenues dans ces fruits.

Si le nitrate de plomb dans les expériences de J. STOKLASA [360] (1911) et de A. STUTZER [634 b] (1916) a augmenté le rendement pondéral des betteraves et élevé la teneur en sucre de ces dernières, dans celles de O. MUNERATI, G. MEZZADROLI et T. V. ZAPPAROLI [458] (1914) il n'a donné aucun résultat positif.

A. STUTZER [634 b] a constaté, d'autre part, que les pommes de terre étaient très sensibles à l'action du plomb qui diminuait les rendements en tubercules et en fécule.

Pour se rendre compte de l'importance des « oligo-éléments » sur la qualité d'une plante déterminée certains auteurs ont opéré de façon systématique. C'est ainsi que M. E. PRONIN et V. P. GOLLE [783] (1936) ont expérimenté séparément sur la betterave sucrière 15 oligo-éléments différents.

Avec le bore, le manganèse, le cuivre, le zinc auxquels ce Mémoire est plus spécialement consacré, ils ont étudié le brome, le lithium, l'aluminium, le vanadium, le cobalt, le strontium, le cadmium, le tungstène, l'uranium, etc... Dans ces essais, effectués en pots sur un sol noir de l'Ukraine (10 mg. de l'oligo-élément par kilogramme de sol sec, sauf pour Bo introduit à une dose dix fois moindre), seuls Bo, Br, Tu, Cu, Cd ont augmenté le rendement pondéral, mais ils ont en même temps diminué la teneur en sucre.

D'autres chercheurs ont étudié l'action sur la qualité d'un mélange de plusieurs catalyseurs : C. BRIOUX et E. JOUIS [253] (1934) expérimentant en plein champ un mélange composé de sulfate de manganèse (15 kg.), de borate de soude (15 kg.) et de sulfate de cuivre (10 kg.), sur une culture de pommes de terre ont obtenu avec celui-ci une teneur plus élevée en fécule, par rapport aux témoins (14,65 p. 100 dans ces derniers, 15,11 avec les catalyseurs). Sur la betterave à sucre, les mêmes auteurs ont constaté

avec le mélange suivant : 18 kg. sulfate de manganèse, 12 kg. sulfate de cuivre et 12 kg. borate de soude par hectare, une légère augmentation de la richesse en sucre (témoins : 13,73 p. 100 ; avec catalyseurs : 14,04 p. 100).

Un mélange comprenant tous les éléments de la solution nutritive de P. MAZÉ [105] (1919) qui n'existent pas déjà en abondance dans les sols, plus le cuivre, mélange employé en quantité telle qu'il apporte par hectare :  $\text{SO}^4\text{Mg}.7\text{H}^2\text{O}$ , 20 kg. ;  $\text{SO}^4\text{Mn}.4\text{H}^2\text{O}$ , 15 kg. ;  $\text{SO}^4\text{Zn}.7\text{H}^2\text{O}$ , 7 kg. 500 ;  $\text{SO}^4\text{Cu}.5\text{H}^2\text{O}$ , 7 kg. 500 ;  $\text{B}^4\text{O}^7\text{Na}^2.10\text{H}^2\text{O}$ , 3 kg. ; NaF, 1 kg. 200 ; NaI, 0 kg. 900 ;  $\text{AsO}^4\text{HNa}^2.12\text{H}^2\text{O}$ , 0 kg. 900, a été expérimenté sur la betterave à sucre par G. JORET et H. MALTERRE [784] (1939) en sol de limon et par G. GUYON et COLLIER [785] (1940) sur un sol riche de Limagne. Ces auteurs n'ont pas trouvé de différence (avec ou sans « oligo-éléments ») en ce qui concerne la densité du jus.

H. BURGEVIN [786] (1940), essayant le même mélange sur le lin, a obtenu une production de graines légèrement supérieure avec les « oligo-éléments » mais la teneur en matière grasse de celles-ci ainsi que l'indice d'iode de l'huile étaient les mêmes, avec ou sans catalyseurs.

## II

### EXPÉRIENCES PERSONNELLES

Mon programme de recherches comportant l'étude de l'influence des « oligo-éléments » sur la fixation biologique de l'azote et celle-ci m'obligeant à une détermination rigoureuse de cet élément dans les plantes obtenues dans mon expérience de culture décrite précédemment, j'avais une occasion d'examiner l'action possible des « catalyseurs » considérés sur la « qualité » de la récolte. Cette qualité, dans le cas du pois, pouvait s'exprimer, en effet, par la teneur des graines en matières protéiques (légumine notamment). Aussi, au lieu de doser l'azote sur l'ensemble de la récolte de chaque vase de culture, ai-je séparé les différentes parties des plantes et effectué la détermination sur chacune d'elles<sup>1</sup>. Il me paraissait logique d'admettre que les matières protéiques des graines, organes qui m'intéressaient plus spécialement, étaient en relation directe avec la teneur en azote de ces dernières.

Sans doute, cet azote que j'ai dosé par la méthode de O. FÖRSTER [787], après vérification de celle-ci (voir p. 131), était nécessairement pour l'étude de sa fixation biochimique l'azote total, c'est-à-dire qu'il pouvait renfermer un peu de N nitrique. En ce qui concerne les graines, ce fait est absolument négligeable. Les nitrates, en effet, lorsqu'ils sont présents dans les plantes, se trouvent dans les racines et surtout dans les tiges (M. BERTHELOT [788] (1884)) ; les feuilles n'en renferment guère, les fleurs, les graines n'en contiennent pour ainsi dire pas ; l'azote est dans ces dernières à l'état protéique.

---

1. Ainsi qu'il sera dit plus loin, cette détermination a porté pour chacune de ces différentes parties sur la *totalité* de la matière végétale recueillie.

J'ai dosé par la méthode de Th. SCHLÆSING (appliquée aux végétaux selon les indications données par A. DEMOLON [789]) 0 mg. 84 seulement de N nitrique dans 100 g. de graines de pois sèches. E. KOHN-ABREST et S. KAWAKIBI [790] (1926) ne trouvent pas trace de nitrates dans la graine de lentille, seule graine examinée dans leur étude des nitrates contenus dans les tissus végétaux.

Le tableau suivant indique, pour 100 g. de matière sèche, la teneur *moyenne* en azote des graines récoltées sur les pots-témoins et sur chaque pot ayant reçu dans l'expérience de culture considérée ci-dessus, soit 2 mg., soit 5 mg., par kilogramme de terre sèche, de l'un des « oligo-éléments » étudiés. Pour plus de détails, on se reportera à la description de cette expérience que j'ai faite précédemment (voir p. 67 et suiv.). Les dosages effectués pour chaque lot, je le souligne, *sur la totalité des graines récoltées*, ont été pour les lots identiques particulièrement concordants.

| N des Graines<br>p. 100 de mat. sèche |                                                                                                                                                                                             |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------|---------------|------|---------------|------|--------------|------|----------------|
| Témoins (a)                           | <table><tr><td>I . . . . .</td><td>4,47</td></tr><tr><td>II . . . . .</td><td>4,40</td></tr><tr><td>III . . . . .</td><td>4,43</td></tr><tr><td>IV . . . . .</td><td>4,42</td></tr></table> | I . . . . .         | 4,47 | II . . . . .  | 4,40 | III . . . . . | 4,43 | IV . . . . . | 4,42 | moyenne : 4,43 |
| I . . . . .                           | 4,47                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| II . . . . .                          | 4,40                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| III . . . . .                         | 4,43                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| IV . . . . .                          | 4,42                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Par kg. de terre supposée sèche :     |                                                                                                                                                                                             |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Bo                                    | <table><tr><td>2 mg. (b) . . . . .</td><td>4,28</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,72</td></tr></table>                                                                               | 2 mg. (b) . . . . . | 4,28 | 5 mg. . . . . | 4,72 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. (b) . . . . .                   | 4,28                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,72                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| F                                     | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,83</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,94</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,83 | 5 mg. . . . . | 4,94 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,83                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,94                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| As                                    | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>5,07</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,57</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 5,07 | 5 mg. . . . . | 4,57 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 5,07                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,57                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| I                                     | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,41</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,75</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,41 | 5 mg. . . . . | 4,75 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,41                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,75                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Cr                                    | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,45</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,61</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,45 | 5 mg. . . . . | 4,61 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,45                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,61                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Mn                                    | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,76</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,74</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,76 | 5 mg. . . . . | 4,74 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,76                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,74                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Cu                                    | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,63</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,64</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,63 | 5 mg. . . . . | 4,64 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,63                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,64                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Zn                                    | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,77</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,17</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,77 | 5 mg. . . . . | 4,17 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,77                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,17                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| Pb                                    | <table><tr><td>2 mg. . . . .</td><td>4,99</td></tr><tr><td>5 mg. . . . .</td><td>4,59</td></tr></table>                                                                                     | 2 mg. . . . .       | 4,99 | 5 mg. . . . . | 4,59 |               |      |              |      |                |
| 2 mg. . . . .                         | 4,99                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |
| 5 mg. . . . .                         | 4,59                                                                                                                                                                                        |                     |      |               |      |               |      |              |      |                |

(a) 4 essais-témoins.

(b) 2 essais pour chaque dose d'oligo-élément.

*Ces chiffres montrent nettement qu'aux doses indiquées, les « oligo-éléments » ont élevé, dans la grande majorité, des cas le taux d'azote des graines récoltées. Dans deux cas (2 mg. I, 2 mg. Cr), il n'y a*

pas eu de variation ; dans deux (2 mg. Bo, 5 mg. Zn), il y a eu diminution. L'augmentation ne fut jamais considérable, puisque généralement comprise entre 4 et 7 p. 100 (avec 5 mg. Bo, As, I, Cr, 2 et 5 mg. Mn, Cu, 2 mg. Zn, 5 mg. Pb) ; elle s'éleva néanmoins aux environs de 10 p. 100 avec F, 12 p. 100 avec 2 mg. Pb et atteignit même 14 p. 100 avec 2 mg. As. Cet excédent d'azote résultant de l'apport des « oligo-éléments » est tout de même appréciable, surtout si l'on songe que la graine est sans doute l'organe de la plante le plus difficile à modifier dans son équilibre chimique, comme l'ont fait remarquer M. JAVILLIER et M<sup>lle</sup> A. CRÉMIEU [791] (1928), à propos de l'action des engrais magnésiens sur la teneur du grain de blé en azote et H. BURGEVIN [743] (1938) dans son étude, déjà citée, de l'influence des engrais usuels sur la qualité des récoltes.

Une autre remarque peut être faite : si l'on se reporte aux poids des graines récoltées sur les différents vases, poids indiqués précédemment (voir page 88), et si l'on examine comparativement les rendements trouvés et les taux d'azote, on constate que, pour chaque catalyseur, les graines dont la teneur en azote est un peu plus élevée sont généralement celles dont le rendement pondéral a été un peu plus faible. A cet égard, le cas du zinc est particulièrement typique.

---

*TROISIÈME PARTIE*

---

« OLIGO-ÉLÉMENTS »  
ET PHÉNOMÈNES MICROBIENS  
INTÉRESSANT L'AGRICULTURE

---



## TROISIÈME PARTIE

---

# « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET PHÉNOMÈNES MICROBIENS INTÉRESSANT L'AGRICULTURE

---

Dès 1863, PASTEUR [792] montrait que la destruction de la matière organique « après la mort », considérée jusqu'alors comme un phénomène de nature purement chimique, était en réalité le résultat d'actions essentiellement microbiennes. « Les principes immédiats des corps vivants seraient en quelque sorte indestructibles si l'on supprimait de l'ensemble des êtres que Dieu a créés les plus petits, les plus inutiles en apparence. Et la vie deviendrait impossible parce que le retour à l'atmosphère et au règne minéral de tout ce qui a cessé de vivre serait tout à coup suspendu. »

Trente ans plus tard, dans la leçon d'ouverture de son Cours de chimie biologique à l'Institut Pasteur, leçon qu'il consacrait à l'examen du rôle agricole des microbes, Emile DUCLAUX [793] s'exprimait en ces termes : « Les idées pastoriennes, qui ont transformé tant de choses autour d'elles, ont eu aussi leur retentissement en agriculture, en nous montrant entre le végétal qui meurt et celui qui est destiné à le remplacer toute une série de cultures intermédiaires de microbes chargés de transformer le premier en matériaux utilisables pour le second et d'assurer ainsi cette rotation indéfinie de la matière qui nous est le plus sûr garant du maintien de la vie à la surface du globe. »

C'est dans le sol, *milieu vivant*, que s'accomplissent les actions biologiques extrêmement variées et complexes qui font que toutes les substances édifiées par les végétaux supérieurs se trouvent plus ou moins rapidement dissociées, ramenées à l'état de principes plus simples et finalement complètement minéralisées. Il en est de même également pour les tissus animaux.

La connaissance des réactions qui interviennent dans cette transformation des matières organiques existant naturellement, soit à la surface du sol (couverture des forêts), soit dans le sol même (déchets de récoltes, cadavres d'animaux), ou susceptibles d'y être incorporées comme engrais (engrais verts, fumiers, composts), cette connaissance des réactions, dis-je, et surtout celle de leurs produits

ultimes présentent pour l'Agriculture un intérêt considérable. Il existe, en effet, une relation entre la fertilité du sol, sa teneur en matière organique et l'activité microbienne qui s'y manifeste.

Faut-il rappeler que diverses formes de cette matière organique conditionnent les propriétés physiques des sols, les rapports de ces derniers avec l'air et avec l'eau, leur cohésion, etc..., l'aptitude de ces sols à fixer des bases avec échange d'ions par équivalence ?

Est-il nécessaire de faire remarquer encore, que l'anhydride carbonique résultant de la destruction de cette matière organique est un puissant agent de solubilisation des roches et qu'il contribue activement à la « digestion » des réserves alimentaires insolubles du sol ? Y a-t-il lieu d'insister sur l'intervention dans la nutrition des plantes des nitrates résultant de la transformation des matières organiques azotées ? J'ai parlé, ci-dessus, des diverses formes de la matière organique. Les différents constituants chimiques de cette dernière sont, en effet, plus ou moins rapidement décomposables par les microbes du sol. « Les moins facilement décomposables sont regardés comme jouant un rôle fondamental dans l'amélioration des propriétés physiques et physico-chimiques du sol ; les plus facilement décomposables semblent être plus importantes au point de vue de la fertilité du sol, envisagé comme fournisseur d'aliments aux récoltes. » (S. A. WAKSMAN [794] (1938)).

Ces phénomènes de décomposition, de transformation de la matière organique dont l'importance agronomique est si grande sont réalisés essentiellement par des microbes *humificateurs* et des microbes *nitrificateurs*.

Les premiers, qui appartiennent aux espèces microbiennes aérobies et anaérobies les plus communes du sol : *Bacillus subtilis*, *B. mycoides*, *B. prodigiosus*, *B. mésertericus vulgatus*, *B. butyricus* (*Amylobacter*), etc..., et qui sont aidés dans leur œuvre destructrice par des Actinomyces et divers Hyphomycètes, réalisent la minéralisation des principes ternaires, tels les glucides (sucres, amidon, inuline, etc...) après passage par le stade d'acides organiques ou d'alcools, tels les lipides après leur hydrolyse en glycérol et en acides gras<sup>1</sup>. La cellulose, la lignine qui forment les parois épaisses des cellules végétales sont détruites plus lentement. Si la première de ces substances peut être attaquée par certaines bactéries ou divers champignons, la seconde est infiniment plus résistante<sup>2</sup>. La lignine contribue, d'ailleurs, pour une grande part à la formation de l'« humus » des sols, étape relativement stable dans la décomposition de la matière organique carbonée avant les termes ultimes qui sont l'anhydride carbonique (cet « érémacausis » est une oxydation) et l'eau.

---

1. Une source d'azote est aussi nécessaire pour le fonctionnement de ces micro-organismes.

2. S. A. WAKSMAN et J. HUTCHINGS [795] (1936) ont pu cependant démontrer que les micro-organismes l'attaquent lentement. D'autre part, d'après F. B. SMITH et P. E. BROWN [796] (1935), la lignine peut être partiellement décomposée par un champignon du sol, le *Stereum purpureum*.

Ce serait sortir des limites de ce travail que d'insister davantage sur les processus biologiques qui transforment, après des vicissitudes chimiques multiples, de lourdes molécules initiales en ces produits simples. Ce qui importe surtout, au point de vue agronomique, seul considéré dans ce Mémoire, ce sont les derniers termes de la destruction, qu'il s'agisse de l'anhydride carbonique dans le cas des matières hydrocarbonées, de l'acide nitrique dans le cas des matières azotées ainsi qu'on le verra plus loin. « Ils sont les seuls critères dignes de confiance pour évaluer l'assimilabilité de la matière organique du sol pour les microbes » (S. A. WAKSMAN[794]).

J'ai antérieurement résumé les nombreuses recherches se rapportant à cette production d'anhydride carbonique résultant de la combustion de la matière organique des sols et effectuées après les premiers essais d'INGENHOUSZ [797] (1794), de A. F. DE HUMBOLDT [798] (1799), de Th. DE SAUSSURE [3 b] (1804). Pour plus de détails sur ce phénomène on se reportera donc à mon Mémoire sur le sujet [651] (1934).

Parallèlement à leur humification, les matières organiques azotées présentes ou introduites dans le sol subissent d'autres modifications importantes, du fait de la présence de microbes dits « nitrificateurs » dans le milieu. Les matières protéiques donnent d'abord des amino-acides qui, par oxydation ultérieure, fournissent de l'ammoniac. Cette première phase, l'ammonisation, est produite par des espèces microbiennes très banales comme *B. coli commune*, *B. mycoides*, *B. subtilis*, *B. mesentericus*, *Proteus vulgaris*, *B. ureæ*, *Urobacillus Pasteurii* ainsi que par des levures et des champignons. L'ammoniac est bientôt oxydé et transformé en acide nitreux, cette nitrosation étant due, elle, à des espèces spéciales, les nitrosobactéries (*nitrosomonas* et *nitrosococcus*). Mais l'acide nitreux ne subsiste guère dans le sol. Il est lui-même oxydé et devient de l'acide nitrique par l'action d'un micro-organisme particulier, la nitrobactérie. Cette troisième phase est la nitratisation. Le phénomène de la nitrification s'achève par une réaction d'ordre purement chimique, la neutralisation par les bases du sol de l'acide nitrique produit.

Sous cette forme ultime de nitrates, l'azote, principe nutritif essentiel engagé à l'origine dans des composés organiques sans grande utilité pour la végétation, est ainsi devenu particulièrement assimilable pour les plantes.

Depuis les premières observations de J. R. GLAUBER [799] (1658), qui attribuait la formation du « nitre » à la décomposition des matières végétales et animales et qui entrevoyait même le rôle des « infiniment petits » dans le phénomène<sup>1</sup> jusqu'aux études les plus récentes de S. WINOGRADSKY, qui isolait en 1890 [800] les organismes

---

1. Dans son ouvrage *Des Deutschlands Wohlfahrt*, il écrivait en effet : « Le nitre peut être ensemencé, cultivé comme les fruits des champs : une petite quantité peut servir de ferment à une immense étendue de terrain qui ne tarde pas à se recouvrir de nitre, de même qu'un peu de levure de bière peut faire fermenter une prodigieuse quantité de pâte. »

spécifiques le réalisant, donnant ainsi aux expériences célèbres de J. B. BOUSSINGAULT [801] (1873-1876), de Th. SCHLÆSING et A. MÜNTZ [802] (1877-1879), de R. WARINGTON [803] (1878-1879), le complément qui leur manquait, la nitrification a été l'objet d'un nombre considérable de travaux précisant ses conditions. Beaucoup de ces derniers ont été évoqués dans des Mémoires anciens et récents de S. WINOGRADSKY [800, 804] et dans une conférence de G. ANDRÉ [805]. On s'y reportera pour les détails, de même qu'on pourra consulter également une bonne bibliographie sur le sujet, dressée par M. LENGLEN [806].

En ce qui concerne seulement l'ammonisation on lira avec intérêt l'important Mémoire de M. LEMOIGNE [807] (1932)<sup>1</sup>.

Les nitrates du sol, produits de la nitrification, non retenus par le pouvoir absorbant, sont souvent entraînés par les eaux de pluie dans le sous-sol, puis dans les eaux de drainage et enfin dans les rivières où ils sont perdus pour la végétation. D'autre part, des espèces microbiennes banales, aérobies ou anaérobies, peuvent en présence de grandes quantités de matières organiques, dans un sol tassé ou saturé d'eau, décomposer ces nitrates et de cette *dénitrification*, heureusement peu fréquente, résultent inévitablement des pertes d'azote. Sans doute, ces dernières sont en partie compensées par l'apport au sol avec les eaux pluviales de petites quantités d'azote combiné existant dans l'atmosphère (ammoniac, nitrates et nitrites), mais cette source est vraiment peu importante et ne permettait pas, vers le milieu du siècle dernier, d'expliquer un fait reconnu depuis longtemps, à savoir l'enrichissement azoté progressif des sols en jachère. J. B. BOUSSINGAULT, de plus, avait trouvé en 1836 [9] dans une culture en pots de trèfle et de pois un excédent d'azote et, un peu plus tard [811] (1844), déterminant la teneur en azote des engrais fournis à une terre soumise à un assolement régulier et d'autre part l'azote des récoltes obtenues sur cette terre, le même auteur, remarquait qu'il y avait toujours plus d'azote dans les récoltes que dans l'engrais distribué. Si l'assolement ne comprenait pas de Légumineuses l'excédent était faible ; s'il comprenait une plante de cette famille, il était beaucoup plus fort. Une culture continue de luzerne, pendant cinq années consécutives, avait exporté 1.035 kg. d'azote alors qu'il n'en avait été fourni au sol à l'origine que 224 kg. Il semblait que le sol devait s'épuiser rapidement après de telles cultures et cependant, il n'en était rien. Un phénomène compensateur devait donc exister pour

---

1. A la fin de ce bref commentaire sur la nitrification, il importe de signaler que d'après les expériences de N. R. DHAR, A. K. BHATTACHARYA et N. N. BISWAS [808] (1933) et celles de N. R. DHAR et S. K. MUKERJI [809] (1941), la nitrification peut se produire en l'absence complète de micro-organismes, pourvu qu'il y ait de la lumière. G. G. RAO [809 bis] (1934) a fait une observation analogue. La nitrification selon ces auteurs, serait davantage un processus photochimique que bactérien. Il y a lieu cependant de faire remarquer que Th. SCHLÆSING et A. MÜNTZ [802 a, 810] (1879), examinant cette influence de la lumière sur le phénomène, n'ont pas constaté une action de cette dernière. Dans leurs expériences, la quantité de  $\text{NO}^3\text{H}$  formée dans un sol était à peu près la même à l'obscurité ou à la lumière.

assurer la régularisation du cycle de l'azote dans la nature. Dans ce phénomène, il était tout naturel de penser que l'azote gazeux contenu dans l'atmosphère en quantités prodigieuses devait intervenir en se fixant directement soit sur la plante, soit sur la terre elle-même.

De nombreuses observations, tant celles de BOUSSINGAULT que certaines fort anciennes, permettaient de supposer que les Légumineuses jouaient en la circonstance un rôle particulier. Il y avait bien longtemps, en effet, que les propriétés « améliorantes » de ces dernières avaient été reconnues. VIRGILE dans ses « Géorgiques » les a mentionnées<sup>1</sup>, XÉNOPHON [813], THÉOPHRASTE [814], PLINE [815], CATON, VARRON, COLUMELLE, PALLADIUS<sup>2</sup> en parlent dans leurs ouvrages.

Je ne retracerai pas dans ce Mémoire dont l'étendue est nécessairement limitée, l'évolution de cette importante question de la fixation de l'azote atmosphérique, les recherches et aussi les controverses célèbres que depuis les premiers essais de PRIESTLEY [820], d'INGENHOUSZ [821] (1787), de Th. DE SAUSSURE [3 c] (1804), elle a suscitées et auxquelles devaient participer J. B. BOUSSINGAULT [9, 822] (1838-1854), J. LIEBIG [823] (1845), G. VILLE [824] (1850-1857), J. B. LAWES, J. H. GILBERT et E. PUGH [825] (1857-1859), P. DEHÉRAIN [826] (1871), Th. SCHLÆSING [827] (1875-1889), M. BERTHELOT [828] (1876-1893). Je n'évoquerai pas davantage les travaux aujourd'hui classiques de H. HELLRIGEL et H. WILFARTH [829] (1883-1887), E. BRÉAL [830] (1888-1889), M. W. BEIJERINCK [831] (1888), A. Th. SCHLÆSING et E. LAURENT [832] (1890-1892), S. WINOGRADSKY [833] (1893-1894), donnant la solution du problème, solution qui a dû attendre les progrès de la microbiologie. Ces travaux figurant dans tous les traités de chimie et de microbiologie agricoles, on se reportera à ces ouvrages.

Je dirai simplement, ici, qu'il y a effectivement emprunt à l'atmosphère d'azote élémentaire par le sol et la végétation et que dans le processus, les microbes jouent un rôle prépondérant. Ces

1. Virgile dit :

*Aut ibi flava seres mutato sidere farra,  
Unde prius laetum siliqua quassante legumen  
Aut tenuis fetus viciae tristisque lupini  
Sustuleris fragiles calamos silvanque sonantem.*

(Tu ne sèmeras les blonds épeautres, au retour de la saison, que là même où tu auras récolté auparavant de plantureux légumes à la tremblante silique, ou les graines menues de la vesce, ou la forêt bruissante des frères tiges de l'amer lupin) [812].

2. *Quae segetem stercoreant fruges, lupinum, faba, vicia.* (Le lupin, la fève, la vesce servent d'engrais...) écrit CATON [816].

*Quaedam etiam serunda non tam propter praesentem fructum, quam in annum prospicientem...* (Certaines plantes sont cultivées non pas tant pour le produit immédiat qu'on en retire, que pour l'amélioration d'une récolte à venir...) note VARRON [817].

*Sed ex iis, quae retuli, seminibus, idem Saserna putat aliis stercoreari et juvari agros, aliis rursus peruri et emactari. Stercoreari lupino, faba, vicia, ervilia, lente, cicercula, piso...* (De ces différentes productions dont je viens de parler, les unes, nous dit encore SASERNA, fument et bonifient la terre et les autres l'amaigrissent et l'épuisent. Il ajoute que les lupins, les fèves, la vesce, la lentille, l'ers, la ciceroles, le pois, servent d'engrais...) lit-on dans le *De Re Rustica* de COLUMELLE [818]. La luzerne fume les terres... *Agrum stercoreat...* trouve-t-on encore dans le traité d'Agriculture de PALLADIUS [819].

derniers ne se comportent plus tout à fait comme des agents de désagrégation de la matière organique. Ils aident cette fois les plantes supérieures dans leur travail de synthèse puisqu'il a été reconnu que les plus intéressants vivent en association étroite, en « symbiose » avec certaines de ces plantes, notamment les Légumineuses, captent l'azote de l'air et le cèdent à ces dernières sous forme de substances organiques azotées en échange d'aliments hydrocarbonés. Cette formation de matières azotées a lieu dans les renflements plus ou moins volumineux existant surtout sur les racines desdites Légumineuses<sup>1</sup>, les *nodosités*, observées dès 1679 par MALPIGHI [846] et étudiées par nombre de savants, en particulier par ERIKSSON [847] (1873), E. PRILLIEUX [848], B. FRANK [849] (1879), MARSHALL WARD [850] (1887-1889), VUILLEMIN [851], A. PRAZMOWSKI [852], P. VAN TIEGHEM et DOULLIOT [853], M. W. BEIJERINCK [831] (1888), E. LAURENT [854] (1890), P. A. DANGEARD [855] (1926). Ces nodosités contiennent une multitude de petits corps bactériiformes dénommés *bactéroïdes* par BRUNCHORST [856] (1885), ressemblant chez le haricot et le lupin aux bacilles les plus communs, mais présentant par contre chez le pois et la vesce une forme ramifiée en Y ou en T. Les bactéroïdes que WORONIN en 1866 [834 a] identifiait comme de véritables bactéries, constituent en réalité une transformation des bactéries fixatrices proprement dites, bactéries aérobies isolées, cultivées sur milieu artificiel en 1888 par BEIJERINCK [831] et désignées par ce dernier sous le nom de *Bacillus* ou de *Bacterium radiculicola*. D'après l'hypothèse admise, cette forme « bactéroïde » serait attaquée par les diastases sécrétées par les racines des Légumineuses et permettrait à ces plantes d'utiliser l'azote capté par la bactérie fixatrice, dont le pouvoir est véritablement spécifique, en dehors de toute symbiose, ainsi que l'a montré P. MAZÉ, en 1897 [857]. On estime à 100-200 kg. par hectare, la quantité d'azote fixée par ces bactéries des nodosités radicales des Légumineuses.

Ces bactéries ne sont pas les seuls micro-organismes fixateurs d'azote existant dans les terres. Laissant de côté certaines Mucédinées auxquelles divers auteurs ont reconnu cette propriété alors que d'autres l'ont contestée, je citerai surtout ici, comme présentant un intérêt agronomique réel, deux organismes qui vivent à l'état

1. Ces plantes ne sont pas les seules qui portent des nodosités. On trouve aussi ces dernières dans d'autres familles végétales, mais la preuve qu'elles contiennent également des microbes fixateurs de N atmosphérique a seulement été établie dans quelques cas, notamment pour les *Alnus* (M. WORONIN [834] (1866), E. R. SPRATT [835] (1912), C. H. BORNEBUSCH [836] (1914)), l'*Eleagnus* (L. HILTNER [837] (1896)), le *Ceanothus* (W. B. BOTTOMLEY [838] (1915)), les *Cycas* dont, d'après E. R. SPRATT [835 a] (1915), les nodosités renfermeraient à la fois le *Bac. radiculicola* et des *Azotobacter*. F. NOBBE et L. HILTNER [839] (1899), L. MONTEMARTINI [840] (1906) ont constaté que les nodosités radicales de *Dastica Cannabina* contiennent des bactéries tout comme celle des Légumineuses. D'après M. C. RAYNER [841] (1922) une Ericacée, *Calluna vulgaris*, fixerait N atmosphérique dans ses feuilles par l'intermédiaire d'un champignon, *Phoma Betae*, qui envahit toute la plante. Cette formation des nodosités sur les feuilles a été observée chez quelques Rubiacées (*Ardisia*) et Myrsinacées (*Psychotria Pavetta*) par A. ZIMMERMANN [842] (1902), H. MIEHE [843] (1911-1917), F. C. von FABER [844] (1912-1914), GEORGEVITCH [845] (1916).

libre dans le sol et qui, depuis plus de quarante ans, attirent l'attention des chercheurs : 1<sup>o</sup> le *Clostridium Pastorianum*, isolé en 1893 par S. WINOGRADSKY [833, 858], microbe anaérobie faisant partie du groupe des ferments butyriques du sol, connus depuis Pasteur et désignés souvent depuis TRÉCUL et VAN TIEGHEM du nom d'*Amylobacter* ; 2<sup>o</sup> l'*Azotobacter*, microbe aérobie découvert en 1901 par M. W. BEIJERINCK [859] qui distingua à l'origine deux espèces : *Azotobacter chroococcum* et *Azotobacter agilis* auxquelles, dans la suite, s'ajoutèrent plusieurs autres<sup>1</sup>, la première restant d'ailleurs la plus intéressante. Le *Clostridium* et l'*Azotobacter* peuvent d'ailleurs fonctionner en association étroite ainsi que l'a montré W. L. OMELIANSKY [862] (1915), la pénétration du microbe anaérobie dans un milieu aéré s'effectuant comme il a été reconnu, sous la protection de l'aérobie.

Le caractère le plus saillant de ces microbes, qui en fait un groupe physiologique bien défini, est leur faculté de pulluler dans un milieu dépourvu d'azote combiné, à condition d'avoir à leur disposition un excès de certaines matières hydrocarbonées accompagnées de divers éléments minéraux. En l'absence de glucides il n'y a pas fixation d'azote de l'air. Ces microbes, par cela même, n'ont jamais pu être observés directement dans le sol et seulement il a été constaté qu'une terre qui en donne des cultures, avec l'apport glucidique, fixe mieux l'azote qu'une autre qui n'en donne pas. S. A. WAKSMAN [863] (1935) écrit avec raison : « Il y a cependant un point qui n'est pas encore élucidé, à savoir si ces organismes (les *Azotobacter*) fixent réellement l'azote dans le sol des champs. L'idée a trouvé un appui dans le fait que l'énergie disponible du sol n'est pas fournie sous la forme de mannite, ou de dextrose, universellement employé dans l'étude des cultures pures..., mais plutôt comme cellulose et autres complexes ternaires, que ces organismes ne peuvent aucunement employer comme source d'énergie. » Il est vraisemblable, en effet, que dans leur ambiance naturelle ces microbes ne trouvent jamais à se nourrir de sucre ou de mannite et qu'ils puisent leur énergie à des sources différentes. Il a d'ailleurs été démontré récemment [864] (1938) qu'ils sont adaptés à des aliments de constitution plus simple, tels que les produits les plus banaux d'un grand nombre de fermentations ; alcools éthylique et butylique, sels des acides acétique et butyrique, et que c'est même aux dépens de ces substances que les souches suivent une évolution normale. Quoi qu'il en soit, ce processus de fixation de l'azote par l'*Azotobacter* ou des microbes s'en rapprochant<sup>2</sup> qui était probablement celui intervenant dans les expériences de M. BER-

---

1. *Azotobacter vinelandii* et *Azotobacter beijerinckii* isolés par J. G. LIPMAN [860] (1903-1904), *Azotobacter vitreum* isolé par F. LÖHNIS et T. WESTERMANN [861] (1908).

2. En 1922, G. TRUFFAUT et N. BEZSSONOF [865] ont isolé du sol de Versailles un nouveau microbe fixateur d'azote. Ce microbe aérobie, voisin du *Proteus vulgaris*, dénommé *Bacillus Truffauti*, est mobile, sporulé, liquéfie la gélatine, assimile la mannite, le glucose, le lévulose, l'amidon, fixe N atmosphérique à raison de 2 à 7 mg. par gramme de glucide consommé. Abondant dans les sols, c'est un dénitrifiant énergique et il produit dans les milieux liquides des traces d'alcool éthylique et d'acide acétique.

THELOT [828] relatives à cette fixation par les terres nues, s'il mérite d'être considéré, ne peut cependant pas fournir une source importante d'azote pour les sols en place, ainsi que le rappelaient encore récemment N. R. DHAR, E. V. SESHACHARYULU et S. K. MUKERJI [866] (1941). S. A. WAKSMAN [867] (1931) estime que l'apport d'azote par cette fixation microbienne dont le mécanisme reste encore inconnu<sup>1</sup>, peut varier de 11 à 45 kg. par hectare et par an.

\* \* \*

Sur ces trois phénomènes microbiens : combustion de la matière organique, nitrification, fixation de l'azote atmosphérique, se réalisant dans un milieu aussi complexe que la terre, l'homme n'a évidemment qu'une action assez restreinte. Néanmoins, j'estime que celle-ci peut être tout de même efficace. J'ai fait observer précédemment [651] (1934), après d'autres d'ailleurs, que l'agriculteur pouvait, par un travail raisonné du sol, intervenir utilement sur l'activité des deux premiers. Il peut agir également au moyen des engrais. L'influence des fertilisants usuels sur les trois phénomènes a été souvent démontrée avec certitude, mais celle des « engrais catalytiques » lorsqu'elle a été étudiée, notamment en ce qui concerne la nitrification, a été controversée. J'ai pensé qu'il y avait quelque intérêt à examiner de nouveau cette action des « catalyseurs » et j'ai effectué dans ce but les expériences décrites ci-après, leur exposé étant précédé d'un bref résumé des principaux travaux antérieurs sur le sujet.

---

1. Récemment, S. WINOGRADSKY [868] (1941) a donné, à la suite d'observations nouvelles, une explication du processus chimique de la fixation microbienne de N. L'auteur conclut à la synthèse de  $\text{NH}_3$  par l'intermédiaire d'un système catalyseur dénommé « azohydrase », provoquant la déshydrogénation du substratum et la combinaison de l'hydrogène activé à l'azote moléculaire. L'ammoniac apparaît dès le début du développement des *Azotobacter*, une partie est mobilisée par les cellules de celui-ci, le reste est exhalé dans le milieu ambiant. Le sol serait apte à capter l'azote de l'atmosphère par un processus de réduction sans exiger une densité élevée des cellules d'*Azotobacter*, ni même leur présence à l'état de vie active.

## A. — « OLIGO-ÉLÉMENTS », COMBUSTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET NITRIFICATION

### I

#### TRAVAUX ANTÉRIEURS

Si E. WOLLNY, par de nombreux travaux effectués de 1880 à 1890 [869], a montré l'influence de divers sels communs sur l'oxydation biologique du carbone des matières organiques il a aussi étudié accessoirement l'action sur ce phénomène de quelques substances antiseptiques susceptibles d'être rangées aujourd'hui parmi les « biocatalyseurs ». Le célèbre professeur de Munich a notamment ajouté à des sols riches en humus ou à des mélanges de sols, de l'acide borique (aux doses de 0,33 et 0,67 p. 100), du borate de sodium (1,05 p. 100), de l'iode, du sulfate de cuivre et aussi de l'acide chromique, à la dose de 0,045 p. 100. Au moyen d'une technique particulièrement adaptée, WOLLNY dosait tous les jours ou tous les deux jours l'anhydride carbonique dégagé. On concevra sans peine que toutes les substances incorporées aux doses indiquées ci-dessus, diminuaient considérablement la production de ce gaz (de 50 à 70 p. 100 et même de 90 p. 100 dans le cas de l'acide chromique) [869 a].

Il n'apparaît pas que le champ d'investigation de ce précurseur ait été ensuite, sinon étendu, tout au moins approfondi. Pendant plus de quarante ans, les travaux qui suivront concerneront avant tout l'action des engrais « courants » sur la combustion de la matière organique du sol préexistante ou ajoutée.

WOLLNY avait constaté que les nitrates et les phosphates favorisaient le phénomène « à condition que la quantité de ces sels ne dépasse pas certaines limites à partir desquelles ils exercent une action nuisible ». HESSELINK VAN SUCHTELEN, en 1910 [870] trouvera aussi que d'autres engrais azotés ou phosphatés, tels le sulfate d'ammonium et le superphosphate, augmentent l'activité bactérienne du sol, celle-ci étant mesurée par la quantité de  $\text{CO}_2$  dégagée. J. STOKLASA, en 1926 [871], confirmait cet accroissement de la production de l'anhydride carbonique par l'apport au sol des engrais précités. Un peu antérieurement, A. DEMOLON et P. BOISCHOT [872] (1923), étudiant l'activité biologique de la tourbe des vallées crayeuses de la Somme et de l'Aisne, par la numération des germes et la quantité de  $\text{CO}_2$  produite, observaient aussi une accélération des phénomènes microbiens par l'addition au milieu de phosphates basiques.

Mais si ces travaux et d'autres non évoqués ici, que j'ai résumés dans un Mémoire déjà cité, publié naguère [651], montrent l'intérêt très légitime témoigné par les chercheurs aux réactions provoquées par ces fertilisants « usuels » sur le phénomène considéré, il ne semble pas que les « oligo-éléments » aient bénéficié non de la même faveur, mais tout au moins de quelque attention. A partir de 1933, seulement deux études se rapportant à ces derniers peuvent à ma connaissance être mentionnées.

P. DOPTER [873] (1933-34) se proposant surtout de comparer l'efficacité du nitrate de soude du Chili à celle du nitrate synthétique a examiné

l'influence des éléments dits « secondaires » du nitrate chilien et notamment de l'iode sur la production de  $\text{CO}^2$  par le sol, celle-ci mesurant l'activité microbienne de ce dernier. Cet auteur a trouvé qu'un sol auquel le métalloïde était incorporé à une dose correspondant sensiblement à celle fournie par une forte fumure nitrique, produisait au bout de cinq jours, 258 mg. de  $\text{CO}^2$  alors que la même quantité de terre non additionnée d'iode donnait 253 mg. Mais la durée vraiment trop courte de l'expérience réalisée rend ces résultats peu significatifs.

C. R. IYER, R. RAJAGOPALAN et V. SUBRAHMANYAN [874] (1934), ajoutant à un sol  $\text{MnO}^4\text{K}$ , constatent (comme il fallait s'y attendre d'ailleurs) que cet agent d'oxydation accélère considérablement la décomposition de la matière organique et pendant la première quinzaine augmente le nombre des bactéries et des actinomyces. L'ammonisation et la nitrification, par contre, ne sont pas affectées.

En ce qui touche ce dernier phénomène que j'ai également étudié, la littérature agronomique est cette fois riche en références concernant l'action exercée sur lui non seulement par divers sels constituant des engrais usuels, mais aussi par des engrais dits « catalytiques » examinés dans le présent Mémoire.

Si après les expériences classiques de Th. SCHLÖESING et A. MÜNTZ [802 a] (1879) nombre de travaux, depuis ceux déjà anciens de P. PICHARD [875] (1884), R. WARINGTON [876] (1885), P. P. DEHÉRAIN [877] (1888), F. DUMONT et F. CROCHETELLE [878] (1893) jusqu'à ceux plus récents de A. B. BEAUMONT [879] (1932), P. DOPTER [880] (1936), G. S. FRAPS et A. STERGES [881] (1939), se rapportent essentiellement aux premiers de ces fertilisants, des études plus générales comme celles de E. BOULLANGER et L. MASSOL [882] (1904) et de J. E. GREAVES, seul [883] (1922) ou en commun avec E. G. CARTER et H. C. GOLDTHORPE [884] (1919), études dont il sera question plus loin, concernent à la fois les engrais « communs » et quelques engrais « catalytiques ». Ces derniers étant les seuls considérés dans mon travail, je résumerai simplement ci-après les plus importantes recherches qui ont été effectuées sur les rapports de chacun d'eux avec la nitrification.

En 1910, J. G. LIPMAN, P. E. BROWN et I. S. OWEN [885] constataient qu'un carbonate de calcium commercial contenant 2 p. 100 de bore incorporé à un sol diminuait l'activité bactérienne de ce dernier et notamment l'ammonisation.

F. C. COOK et J. B. WILSON [91 a] (1918) à Arlington n'ont pas trouvé de différence sensible entre les taux d'azote nitrique de parcelles ayant reçu des doses variables d'acide borique (0,00176 ; 0,0044 p. 100 de sol) et ceux de parcelles témoins.

J. VOICU [886] (1923) a cultivé respectivement les ferments nitreux et nitrique sur des mâchefers imprégnés, pour les premiers, de liquide d'OMELIANSKY<sup>1</sup> additionné d'une quantité de bore variant de 0 mg. 005 à 100 mg. pour 100 cm<sup>3</sup> et, pour les seconds, du liquide de WINOGRADSKY<sup>2</sup> auquel étaient ajoutées des doses de métalloïde s'échelonnant entre 10 et 100 mg. pour 100 cm<sup>3</sup>. Il n'a observé aucune action favorable du bore sur la nitrification et a même constaté que les doses les plus élevées (au-dessus de 20 mg.) étaient généralement toxiques.

Par contre, E. V. BOBKO et M. A. BELVOUSSOW [887] (1936) expérimentant avec un sol podzotique de l'Extrême-Orient ont constaté une influence favorable de l'acide borique (à la dose de 0 mg. 5 par kilogramme) sur la nitrification du sulfate d'ammonium.

Bien antérieurement, E. BOULLANGER et L. MASSOL [882] (1904),

1. Le milieu d'OMELIANSKY contient : Eau distillée 1.000 cm<sup>3</sup> ;  $\text{SO}^4(\text{NH})^2$  : 2 g. ;  $\text{NaCl}$  : 2 g. ;  $\text{PO}^4\text{K}^2\text{H}$  : 1 g. ;  $\text{SO}^4\text{Mg}$  crist. : 0 g. 5 ;  $\text{SO}^4\text{Fe}$  : 0 g. 4 et du carbonate de magnésium (0 g. 5 pour 50 cm<sup>3</sup> du milieu). VOICU a employé ce milieu contenant une dose moitié moindre de sulfate d'ammonium (1 g. par litre au lieu de 2 g.).

2. Le milieu de WINOGRADSKY a la composition suivante : Eau distillée : 1.000 cm<sup>3</sup> ;  $\text{NO}^3\text{K}$  : 1 g. ;  $\text{PO}^4\text{K}^2\text{H}$  : 0 g. 5 ;  $\text{SO}^4\text{Mg}$  crist. : 0 g. 3 ;  $\text{CO}^2\text{Na}^2$  calciné : 1 g. ;  $\text{NaCl}$  : 0 g. 5 ;  $\text{SO}^4\text{Fe}$  : 0 g. 4.

opérant sur le milieu d'OMELIANSKY (sans  $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$ ) ensemencé avec de la terre, avaient obtenu la nitrification complète du borate d'ammonium (avec une quantité correspondant à 0 g. 257  $\text{NH}_3$  par litre), comme d'ailleurs celle du fluorure, de l'arsénite, de l'iode d'ammonium (à une dose moitié moindre pour ces deux derniers sels).

Ces mêmes auteurs, au cours de leurs belles études sur les microbes nitrificateurs, observaient également une nitrification parfaite du sulfate d'ammonium (2 g. par litre) en présence des carbonates de manganèse, de cuivre, de plomb, de zinc... qu'ils substituaient respectivement au carbonate de magnésium (0 g. 5 par litre) de leur milieu initial.

J. E. GREAVES [888] (1913), étudiant l'effet de différents composés arsenicaux sur l'ammonisation et la nitrification du sang desséché dans un sol sableux riche en calcium et en fer et abondamment pourvu de principes fertilisants à l'exception de l'azote, a constaté l'influence favorable des très petites doses d'arsenic (de l'ordre de 50 p. p. million), la toxicité des doses fortes.

R. GUILLIN [889] (1916), suivant comparativement dans une terre argilo-calcaire la nitrification du cuir tanné et du cuir chromé, a trouvé que le sesquioxyde de chrome contenu dans ce dernier entravait non seulement la nitrification mais détruisait les nitrates préexistants.

G. LÉONCINI [890] (1914), expérimentant sur des sols calcaire, argileux, humifère avec quelques composés oxygénés du manganèse, a observé une influence favorable de  $\text{MnO}_2$  sur la nitrification lorsque l'apport était de l'ordre de 3 à 5 qx par hectare.

P. E. BROWN et G. A. MINGES [891] (1916) ont trouvé que la nitrification du sulfate d'ammonium dans un sol argileux de la station de Iowa était activée par l'addition de sulfate, chlorure ou nitrate de manganèse (92 kg. environ, par hectare).

E. P. DEATRICK [379] (1919) a constaté que si des concentrations même faibles de sulfate de manganèse favorisaient l'ammonisation du sang desséché, elles arrêtaient au contraire la nitrification du sulfate d'ammonium dans le sol.

D. A. OLARU [341 a] (1920) étudiant seulement l'ammonisation, a montré également que celle-ci, en milieu liquide ou dans la terre, était influencée favorablement par le sulfate de manganèse (l'addition de Mn oscillant entre 0 mg. 01 et 0 mg. 1 pour 50  $\text{cm}^3$  de liquide ou 50 g. de terre).

J. E. GREAVES, E. G. CARTER et H. C. GOLDTHORPE [884] (1919), Z. PIETRUSZCZINSKI [892] (1923), D. H. NELSON [893] (1929) ont aussi mis en évidence l'action utile des sels de manganèse sur la nitrification du sang desséché ou du sulfate d'ammonium dans le sol.

G. PATUREL [894] (1913) s'est demandé si l'accumulation du cuivre dans le sol des vignobles, du fait des traitements anticyptogamiques, ne constituait pas à la longue une entrave à la nitrification. Les expériences lui ont montré que ce phénomène était peu influencé par le sulfate de cuivre apporté, en raison vraisemblablement de l'insolubilisation rapide de ce dernier : avec une dose de 2 p. 100, la nitrification par rapport au témoin était de 60 p. 100 ; elle était de 90 p. 100 avec 1 p. 100 de sulfate de cuivre. C. A. JENSEN [895] (1916) a constaté dans les sols du Colorado une diminution de la nitrification, du fait d'un apport de 111 kg. de sulfate de cuivre par hectare.

W. E. BOWSER et J. D. NEWTON [896] (1933), étudiant l'action herbicide du sulfate de cuivre, ont observé que dans les sols traités celui-ci avait légèrement réduit la nitrification pendant une période assez courte.

C. B. LIPMAN et P. S. BURGESS [897] (1914), contrôlant la valeur agricole des résidus de fonderie, ont examiné l'influence des sulfates de cuivre, de zinc, de plomb sur la nitrification. Ces sels étaient ajoutés respectivement à des doses variant de 0 g. 0125 à 0 g. 150 pour 100 g. de terre (supposée sèche) contenant 2 g. de sang desséché. Après quatre semaines pendant lesquelles les divers lots étaient maintenus à une température et à une humidité convenables, les auteurs constataient que la formation maximum de nitrate se produisait avec des doses d'environ 0,1 p. 100

de sel pour le cuivre et le zinc, mais que le plomb se comportait irrégulièrement et se montrait surtout toxique à petites doses.

C. MONTANARI [898] (1917) a expérimenté avec l'anhydride arsénieux, les sulfates de manganèse, de cuivre, de zinc, le carbonate de plomb qu'il a ajoutés respectivement aux doses de 10 et de 50 mg. pour 100 g. d'un milieu artificiel constitué par du sable siliceux de Toscane purifié et additionné de 2 p. 100 de carbonate de calcium avec une quantité convenable de divers sels (sulfate et phosphate d'ammonium, sulfate de potassium et sulfate de magnésium). Il a constaté que seul le sulfate de manganèse avait exercé une action favorable sur la nitrification. R. A. BERRY [640] (1924), par contre, a trouvé que les sels de plomb accéléraient le phénomène dans le sol.

## II

### EXPÉRIENCES PERSONNELLES

L'exposé sommaire des travaux antérieurs concernant l'influence des « oligo-éléments » sur la combustion de la matière organique et la nitrification dans le sol qui vient d'être présenté, outre qu'il montre l'absence presque complète d'expériences sur le premier de ces phénomènes, met en évidence en ce qui touche le second les résultats discordants obtenus par divers auteurs, du fait surtout de la diversité des conditions expérimentales. Les doses d'« oligo-éléments » employées étaient notamment très différentes et souvent fort exagérées.

C'est pourquoi j'ai jugé utile d'effectuer à ce sujet des recherches personnelles, celles-ci constituant à la fois un complément à mon expérience de culture décrite dans la Première Partie de ce Mémoire et aussi une contribution à l'étude de deux questions, l'une à peine abordée, l'autre encore très controversée.

### MÉTHODE ADOPTÉE

Ainsi que je l'ai fait observer naguère dans les pages que j'ai consacrées plus spécialement à l'examen de la combustion de la matière organique des sols en général [651] (1934), deux méthodes pouvaient être envisagées pour l'étude de l'intensité de ce phénomène. La première, employée dès 1852 par J. B. BOUSSINGAULT et E. LEWY [899], comportait simplement le dosage direct, à diverses périodes, de l'anhydride carbonique existant dans l'atmosphère du sol et la comparaison des quantités trouvées. La seconde, utilisée en 1855 par CORENWINDER [900], consistait à prélever un échantillon de sol, à l'enfermer dans un récipient où l'on faisait passer ensuite un courant d'air dans lequel on dosait le  $\text{CO}_2$  produit.

Ces deux méthodes, je l'ai dit dans le Mémoire précité, sont loin d'être parfaites. La première, si elle permet d'opérer sur le sol en place, ne peut renseigner tout au plus que sur une accumulation

tout à fait provisoire dans celui-ci, de l'anhydride carbonique. Elle ne tient pas compte, en effet, de la diffusion inévitable de ce dernier, par suite notamment des variations barométriques, des vents qui provoquent des échanges ou des déplacements de gaz entre l'air ordinaire et l'atmosphère du sol et qui, par conséquent, modifient la proportion d'anhydride carbonique de celle-ci.

La méthode de CORENWINDER n'apparaît pas non plus entièrement satisfaisante puisqu'elle utilise, par suite des diverses manipulations effectuées, un échantillon de sol qui n'est plus tout à fait semblable, au point de vue de la structure physique et par cela même à celui de l'action des phénomènes, au même sol à l'état naturel. Il est bien évident, en effet, qu'en prélevant l'échantillon de terre et en l'introduisant dans un appareil convenable, on émette nécessairement cet échantillon et on le place dans un état plus propice non seulement à la combustion de la matière organique, mais aussi à la nitrification ainsi que l'ont constaté divers chercheurs et moi-même [651]. L'augmentation de l'activité microbienne dans un milieu solide en fermentation par suite de l'émiettement des particules de ce dernier est d'ailleurs un fait très fréquent, peut-être même général.

Désirant mesurer les variations possibles de l'intensité de la combustion de la matière organique du sol produites par l'incorporation d'« oligo-éléments » à ce dernier, il me paraissait indispensable de déterminer la quantité d'anhydride carbonique *réellement* dégagée dans cette combustion. Aussi ai-je choisi, pour effectuer cette mesure, la méthode de CORENWINDER, malgré son imperfection. Puisqu'il s'agissait avant tout, dans les expériences que je me proposais d'entreprendre, de constater des faits d'ordre général, il ne me semblait pas illogique de négliger la petite cause d'erreur attachée à cette méthode de CORENWINDER, cause d'erreur d'ailleurs plus apparente que réelle, surtout si l'on prend la précaution, ainsi que je l'ai fait, de laisser reposer le sol pendant quelque temps dans les récipients où il a été introduit après les diverses manipulations qui l'ont un moment bouleversé. Après ce repos, les phénomènes qui se passent dans ce sol reprennent peu à peu leur cours normal et les déterminations effectuées peuvent alors fournir des résultats satisfaisants. Ces considérations sont valables aussi bien pour la combustion de la matière organique que pour la nitrification. En ce qui concerne les variations de cette dernière sous l'influence des « oligo-éléments », il m'a paru que celles-ci pouvaient être parfaitement mises en évidence uniquement par le dosage rigoureux des nitrates dans les divers lots après expérience (c'est-à-dire dans les lots ayant servi à mesurer pendant une certaine période le dégagement de  $\text{CO}_2$  produit), le taux de N nitrique existant dans le sol ayant reçu une dose donnée d'un catalyseur étant comparé à celui trouvé dans le sol-témoin.

## DÉTAILS TECHNIQUES

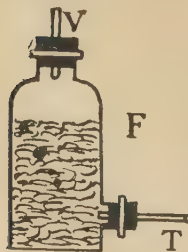
Les « oligo-éléments » considérés dans ces nouvelles recherches étaient évidemment ceux dont j'avais examiné l'action tant sur le rendement que sur la qualité d'une récolte, c'est-à-dire Bo, F, As, I, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb. *Ils ont été fournis aux doses de 2 et 5 mg. par kilogramme de terre supposée sèche*, qui sont celles étudiées dans le travail précité. *J'y ai ajouté*, car j'en avais la possibilité, *celle de 10 mg. par kilogramme de terre sèche*.

J'ai opéré sur un sol ayant exactement même origine que celui utilisé dans mon expérience de culture. Ledit sol, dont les caractéristiques ont été données dans la Première Partie de ce Mémoire, permettait par sa nature ainsi que je l'avais déjà constaté antérieurement [651], une très bonne appréciation des phénomènes de combustion et de nitrification. Vu sa richesse en matières organiques (carbone organique, 4,5 p. 100) et en azote (N organique et ammoniacal 0,455, N nitrique 0,0123 p. 100 de terre supposée sèche) il donnait la possibilité de mesurer facilement, directement si elle s'exerçait, l'action des « oligo-éléments » sans le concours souvent mentionné, on l'a vu, dans les travaux antérieurs, de substances organiques étrangères ou de sels ammoniacaux. Cette terre, il est utile de le rappeler, n'avait jamais reçu d'engrais chimiques ; elle contenait 1,8 p. 100 de calcaire et avait un pH de 6,9.

Avec ladite terre, préalablement tamisée à travers un tamis à trous ronds de 2 mm. et parfaitement homogénéisée, j'ai donc constitué 29 lots identiques (2 servant de témoins) correspondant chacun à 300 g. de terre supposée sèche. Cette quantité, d'après mes expériences antérieures, était suffisante pour produire un volume de  $\text{CO}_2$  facile à déterminer ; n'étant pas trop importante, elle permettait une bonne homogénéité du sol mis en œuvre.

Comme dans mon expérience de culture, les lots ainsi préparés ont été respectivement portés par addition d'eau redistillée dans un appareil en verre, à une humidité de 30 p. 100 de terre sèche. Ce taux voisin de l'optimum pour un tel sol a été maintenu pendant toute la durée des expériences. Avec l'eau nécessaire à l'humidification a été ajouté à l'état de dissolution ou de suspension (Pb) le sel pur apportant pour chacune des doses indiquées ci-dessus, l'« oligo-élément » dont l'étude était envisagée. Comme précédemment Bo, F, As, I, Cr ont été introduits sous forme de borate, fluorure, arsénite, iodure, chromate de sodium ; Mn, Cu, Zn, Pb ont été incorporés à l'état de sulfates.

Après homogénéisation, ces lots de 390 g. de terre humide *bien meuble* ont été placés respectivement, en évitant tout tassement, dans des flacons F de 500 cm<sup>3</sup> à large goulot et portant une tubulure à la partie inférieure (la terre occupait environ les 2/3 du volume du flacon). Cette tubulure était obturée par un bouchon de caoutchouc traversé par un court tube de verre T pénétrant à peine à l'intérieur du flacon. Le goulot, après l'introduction de la terre, était bien bouché avec un bouchon de caoutchouc portant un tube de verre V de 12 cm. environ de longueur. Les 29 flacons, munis de ces différents accessoires, qui avaient été au préalable tarés, ont été ensuite pesés avec leur contenu. Ils ont été recouverts d'étoffe noire afin d'éviter le déve-



loppement des algues et portés à leur place définitive, à l'abri d'un apport extérieur ( $\text{NH}_3$ ), dans une pièce du laboratoire dont la température a été maintenue à peu près constante (19-20°). Je les ai ensuite abandonnés pendant quinze jours.

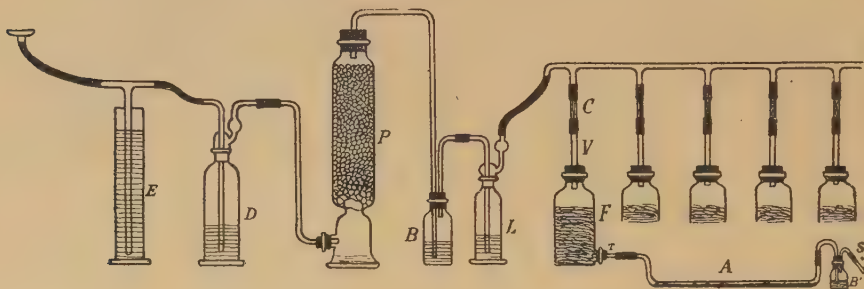
Pour la bonne manifestation des phénomènes étudiés, il était indispensable d'aérer suffisamment la terre et d'autre part, la combustion de la matière organique devant être, je le rappelle, appréciée par la mesure de  $\text{CO}_2$  produit, il y avait lieu d'entraîner ce gaz afin d'assurer son absorption complète dans une solution potassique en vue de son dosage. Un lent courant d'air passant à travers les lots de terre était donc nécessaire, courant d'air dont pour la bonne comparaison ultérieure des résultats le débit devait être le même pour chacun de ces lots. J'ai satisfait à ces conditions de la manière suivante :

Le très lent courant d'air exigé était fourni par la conduite d'air comprimé alimentant le laboratoire. Il était d'abord réglé à cette source au moyen du robinet de la canalisation (un tube manométrique plongeant dans une éprouvette E pleine d'eau et portant un repère, permettait de vérifier ce premier et grossier réglage). Traversant ensuite un flacon de Durand D contenant de l'acide sulfurique fréquemment renouvelé dans lequel il se débarrassait de  $\text{NH}_3$  et aussi partiellement de son humidité, ce courant d'air passait ensuite dans une grande éprouvette P (de 40 cm. de hauteur utile et de 8 cm. 5 de diamètre) pleine de ponce imbibée de lessive de potasse (renouvelée aussi fréquemment) qui le dépouillait de son anhydride carbonique<sup>1</sup>. On sait que, du fait de sa porosité, la ponce retient une grande quantité de potasse qui a tout entière un effet utile. Des essais préliminaires effectués pendant une longue période avec un courant d'air plus rapide m'ont d'ailleurs montré l'efficacité de cet absorbant. D'autre part, un petit flacon B contenant de l'eau de baryte faisait suite à l'éprouvette à ponce et servait de témoin (ce liquide est toujours resté parfaitement clair, pendant la durée de l'expérience). L'air traversait ensuite un flacon laveur L contenant de l'eau bi-distillée bouillie acidulée par quelques gouttes d'acide sulfurique destiné à fixer la baryte susceptible d'être entraînée. Il était réparti également dans les 29 flacons au moyen d'un tube portant 29 tubulures latérales reliées chacune à un tube capillaire C court et étroit. Ces tubes capillaires de même diamètre intérieur et d'égale longueur jouaient en l'espèce, le rôle de robinets de réglage. L'air se heurtant dans tous les lots à la même résistance, sa répartition était absolument égale. J'ai souvent vérifié ce fait, avant et au cours de l'expérience.

Après repos de leur contenu pendant quinze jours, j'ai relié les 29 flacons (par l'intermédiaire du tube V traversant le bouchon de chaque goulot) aux tubulures de cette canalisation distributrice. L'un des flacons-témoins a été raccordé à la première, l'autre à la dernière tubulure de ladite canalisation. Celle-ci laissait passer à travers chaque lot de terre 2 litres 6 d'air en vingt-quatre heures (une bulle de 0 cm<sup>3</sup> 12 barbotait toutes les quatre secondes dans le liquide du dernier flacon laveur). Ce courant d'air était suffisant pour assurer un fréquent renouvellement de l'atmosphère du sol et son faible débit permettait un contact assez prolongé du  $\text{CO}_2$  entraîné avec le réactif absorbant et sa fixation certaine dans ce dernier. L'absorption du gaz a été, en effet, réalisée de la manière suivante : chacun des 29 flacons était relié par sa tubulure inférieure (au moyen du tube T) à un tube à absorption A contenant 10 cm<sup>3</sup> de lessive de potasse à 36° Bé R. P. Les tubes employés étaient simplement des tubes ordinaires en verre épais de 15 mm. de diamètre intérieur, recourbés à leurs extrémités comme l'indique la figure, ci-après et dont la longueur utilisée pour l'absorption était de 35 cm. Sans doute, des tubes à boules et à serpentins (tubes de

1. Pour mémoire, la teneur de l'air ordinaire en  $\text{CO}_2$  est d'environ 0,03 p. 100 en volume (REISER, MÜNZER et AUBIN, etc.). TH. SCHLÖSSING a dosé 2 mg. 25 de  $\text{NH}_3$  dans 100 m<sup>3</sup> d'air atmosphérique.

SCHLÖESING) pouvaient paraître, *a priori*, plus parfaits ; ils l'étaient bien moins au contraire, du fait que, ces tubes n'étant jamais exactement semblables, l'air sortant des flacons aurait eu à vaincre des résistances diverses, d'où débit variable pour les différents lots. Dans le système que j'ai employé, le mélange gazeux ne rencontrait aucun obstacle, le liquide ne remplissant pas le tube. (Lorsque j'introduisais dans ce dernier la lessive de potasse, je la projetais à dessein sur les parois afin que celles-ci en soient bien imprégnées). Des expériences préliminaires m'ont d'ailleurs montré que l'anhydride carbonique dont l'air était chargé, s'absorbait complètement dans la lessive ainsi disposée et cela en raison de la grande surface de contact présentée au gaz par le liquide. Cette absorption était vérifiée par un petit flacon-témoin B' contenant de l'eau de baryte et dans laquelle



l'air, après son passage dans le tube à potasse, venait barboter (la pression à vaincre dans ce flacon, très faible — 2 mm. —, était la même pour tous les lots). Pendant tout le temps que durera l'expérience aucun trouble appréciable de cette eau de baryte ne sera constaté.

Après avoir été dépouillé ainsi de son anhydride carbonique l'air sortait librement en S.

Il y a lieu de faire observer qu'en raison de la disposition de cet appareil, l'air circulant à travers la terre n'était jamais sec et il était important qu'il en soit ainsi afin d'éviter qu'il ne déshydrate cette dernière. La pesée fréquente au cours de l'expérience des divers flacons m'a montré que l'humidité des lots de terre restait toujours constante. A la fin de ladite expérience, la détermination directe de cette humidité vérifiera d'ailleurs le fait.

Avant de réaliser l'expérience définitive, j'ai laissé circuler à travers la terre pendant trois jours, au régime adopté, l'air décarbonaté, afin de bien purger les flacons du  $\text{CO}_2$  produit, tant pendant les manipulations préliminaires que pendant la période de repos de la terre après ces manipulations.

Le 3 mai 1939, j'ai relié l'extrémité inférieure de chaque flacon au dispositif d'absorption décrit ci-dessus. L'expérience alors réellement commencée a été poursuivie jusqu'au 21 juillet suivant. J'ai mis fin à celle-ci lorsque les quantités de  $\text{CO}_2$  trouvées lors des dosages effectués à divers intervalles pendant la période précitée, étaient partout à peu près semblables (y compris celles produites par les témoins). Je donnerai plus loin les raisons de cette uniformité.

Je rappelle que la température de la pièce où se déroulait l'expérience, notée par un thermomètre enregistreur de RICHARD, est restée pendant toute la durée de cette dernière à très peu près constante ( $19-20^\circ$ ) ainsi qu'il convenait.

**Dosage de  $\text{CO}_2$ .** — Entre le 3 mai et le 21 juillet 1939, j'ai effectué à quatre reprises différentes le dosage de l'anhydride carbonique dégagé par chacun des différents lots de terre, de la manière suivante : j'ai transvasé respectivement la lessive de potasse de chaque tube à absorption dans une fiole jaugée de  $50 \text{ cm}^3$  en joignant à cette lessive les liquides de lavage du tube, lavage fait soigneusement à l'eau distillée *bouillie*. Après avoir

complété exactement avec la même eau au volume de 50 cm<sup>3</sup> et rendu homogène j'ai prélevé, toutes ces opérations étant effectuées rapidement, soit 5, soit 10 cm<sup>3</sup> de liquide (selon la date du dosage) dans lesquels j'ai dosé l'anhydride carbonique absorbé<sup>1</sup>, par la méthode de Th. SCHLÆSING [810 b, 652 k]. Celle-ci appliquée au dosage de CO<sup>2</sup> dans une solution absorbante peut se résumer ainsi : dans un petit ballon muni d'un tube à robinet et relié à une trompe à mercure par l'intermédiaire d'un réfrigérant, on introduit quelques centimètres cubes d'acide sulfurique au 1/2, puis on fait le vide dans le système au moyen de la trompe ; quand le vide est réalisé, on coiffe l'extrémité de cette dernière avec une cloche graduée pleine de mercure, ayant été au préalable humectée d'eau afin que le gaz qu'elle contiendra soit, au moment de la mesure, saturé de cette eau. On introduit ensuite dans le ballon, sans faire rentrer d'air, la liqueur potassique. On actionne la trompe et on chauffe légèrement le contenu du ballon. L'anhydride carbonique se dégage et est recueilli dans la cloche. Quand le volume de ce gaz récolté ne varie plus et qu'un bruit caractéristique montre que le vide est de nouveau réalisé dans l'appareil, on retire la cloche avec les précautions d'usage. On effectue la mesure du volume gazeux selon les prescriptions indiquées dans les traités d'analyse gazométrique. J'ai toujours vérifié la pureté du gaz par l'introduction dans la cloche, à l'aide d'une pipette courbe, de quelques centimètres cubes de lessive de potasse. Après projection de celle-ci sur les parois de la cloche, je constatais toujours une absorption complète.

J'ai ramené, comme il est d'usage, le volume du gaz à la température de 0° et à la pression de 760 mm. par la formule classique :

$$V_0 = V \frac{H_0 - h_0 - Ft}{760 (1 + \alpha t)}$$

J'ai exprimé en poids (mg.) la quantité de gaz trouvée, en multipliant le nombre de centimètres cubes de celui-ci par 1,977.

Chaque dosage a toujours été effectué en double.

*Dosage de N nitrique.* — A la fin de l'expérience décrite ci-dessus, c'est-à-dire le 21 juillet 1939, j'ai dosé N nitrique renfermé dans chaque lot de terre mis en œuvre. L'extraction des nitrates a été opérée sur un échantillon correspondant à 200 g. de terre supposée sèche, par agitation de ce dernier pendant une heure à l'agitateur rotatif avec 500 cm<sup>3</sup> d'eau bi-distillée. Après filtration jusqu'à parfaite limpidité du liquide obtenu, 250 cm<sup>3</sup> de celui-ci ont été concentrés à très petit volume (15 cm<sup>3</sup> environ). Ce résidu a été ensuite transvasé dans une fiole jaugée de 25 cm<sup>3</sup> et complété à cette jauge avec de l'eau bi-distillée. Après homogénéisation j'ai effectué le dosage de N nitrique sur 10 et sur 5 cm<sup>3</sup> de chacune des liqueurs obtenues, par la méthode de Th. et A. Th. SCHLÆSING, telle qu'elle est décrite dans mon ouvrage déjà cité [652 b]. Je rappelle que cette méthode est basée sur la propriété que possèdent les nitrates de dégager tout leur azote à l'état de bioxyde d'azote, en présence d'un sel ferreux et d'acide chlorhydrique à l'ébullition. Appliquée au dosage des nitrates dans les sols, elle nécessite un appareil très simple composé d'un petit ballon de 100 cm<sup>3</sup> bouché par un bouchon de caoutchouc portant un entonnoir à robinet (prolongé par un tube semi-capillaire) et un tube à dégagement capillaire de 0 m. 80 de hauteur qui vient déboucher dans une petite cuve à mercure. Le bioxyde d'azote produit est récolté sur le mercure et mesuré avec les précautions d'usage dans l'analyse des gaz. La comparaison du volume trouvé avec celui fourni, exactement dans les mêmes conditions, par une liqueur-type de nitrate de potassium pur particulièrement adaptée permet de déduire facilement la quantité de N nitrique contenue dans la liqueur analysée.

1. J'avais toujours concurremment un tube-témoin contenant 10 cm<sup>3</sup> de la lessive de potasse utilisée et restant bouché. Je dosais le CO<sup>2</sup> de cette lessive, afin d'en tenir compte dans mes calculs.

### RÉSULTATS OBTENUS

Les tableaux suivants indiquent pour les différents lots, exprimés en milligrammes par kilogramme de terre supposée sèche :

1° Les résultats des dosages d'anhydride carbonique effectués entre le 3 mai et le 21 juillet 1939.

2° Les *quantités totales* d'anhydride carbonique produites entre ces deux dates.

3° Les quantités totales d'azote nitrique *formées* pendant cette même période.

#### I

#### Quantités de CO<sup>2</sup> produites entre le 3 mai et le 21 juillet 1939

(en mg. par kg. de terre supposée sèche)

#### RÉSULTATS DES DOSAGES

|                                   |                | Du 3 mai<br>au 19 mai | Du 19 mai<br>au 9 juin | Du 9 juin<br>au 30 juin | Du 30 juin<br>au 21 juillet |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|                                   |                | mg.                   | mg.                    | mg.                     | mg.                         |
| Témoins                           | I . . . . .    | 675,8                 | 549,8                  | 399,0                   | 335,6                       |
|                                   | II . . . . .   | 683,0                 | 543,9                  | 403,5                   | 338,2                       |
| Par kg. de terre supposée sèche : |                |                       |                        |                         |                             |
| Bo                                | 2 mg. . . . .  | 699,6                 | 537,1                  | 408,1                   | 337,2                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 734,5                 | 507,7                  | 413,4                   | 341,8                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 697,7                 | 515,6                  | 409,8                   | 339,1                       |
| F                                 | 2 mg. . . . .  | 754,5                 | 563,0                  | 422,6                   | 360,0                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 759,0                 | 549,2                  | 381,2                   | 358,7                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 752,0                 | 553,2                  | 381,0                   | 362,1                       |
| As                                | 2 mg. . . . .  | 670,2                 | 542,1                  | 397,6                   | 342,3                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 743,7                 | 576,3                  | 430,5                   | 346,6                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 735,2                 | 554,5                  | 410,7                   | 345,8                       |
| I                                 | 2 mg. . . . .  | 768,5                 | 549,2                  | 414,7                   | 356,7                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 766,2                 | 530,1                  | 414,0                   | 335,9                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 764,3                 | 493,2                  | 406,8                   | 346,8                       |
| Cr                                | 2 mg. . . . .  | 744,4                 | 493,8                  | 404,8                   | 343,0                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 794,5                 | 565,1                  | 414,7                   | 358,9                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 770,1                 | 544,6                  | 400,9                   | 340,7                       |
| Mn                                | 2 mg. . . . .  | 746,4                 | 543,3                  | 394,3                   | 352,1                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 758,2                 | 544,8                  | 398,2                   | 340,0                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 767,5                 | 549,9                  | 399,6                   | 345,2                       |
| Cu                                | 2 mg. . . . .  | 745,0                 | 551,2                  | 399,5                   | 346,4                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 743,8                 | 534,7                  | 392,3                   | 343,3                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 751,6                 | 533,4                  | 387,2                   | 341,0                       |
| Zn                                | 2 mg. . . . .  | 737,8                 | 491,0                  | 420,6                   | 348,1                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 744,4                 | 512,2                  | 407,5                   | 342,2                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 718,2                 | 512,0                  | 399,1                   | 340,6                       |
| Pb                                | 2 mg. . . . .  | 728,5                 | 490,5                  | 391,0                   | 321,1                       |
|                                   | 5 mg. . . . .  | 751,6                 | 517,6                  | 372,4                   | 322,4                       |
|                                   | 10 mg. . . . . | 755,6                 | 536,0                  | 364,3                   | 324,4                       |

II

**Quantités totales de CO<sup>2</sup> produites entre le 3 mai et le 21 juillet 1939**

(en mg. par kg. de terre supposée sèche)

|         |              |       |
|---------|--------------|-------|
| Témoins | I . . . . .  | 1.960 |
|         | II . . . . . | 1.968 |

| Avec addition de | 2 mg. | 5 mg. | 10 mg. |
|------------------|-------|-------|--------|
| Bo . . . . .     | 1.982 | 1.997 | 1.962  |
| F . . . . .      | 2.100 | 2.048 | 2.048  |
| As. . . . .      | 1.952 | 2.097 | 2.046  |
| I . . . . .      | 2.089 | 2.046 | 2.011  |
| Cr. . . . .      | 1.986 | 2.133 | 2.056  |
| Mn . . . . .     | 2.036 | 2.041 | 2.062  |
| Cu . . . . .     | 2.042 | 2.014 | 2.013  |
| Zn . . . . .     | 1.997 | 2.006 | 1.970  |
| Pb . . . . .     | 1.931 | 1.964 | 1.980  |

III

**Quantités totales de N Nitrique formées entre le 3 mai et le 21 juillet 1933**

(en mg. par kg. de terre supposée sèche)

|         |              |     |
|---------|--------------|-----|
| Témoins | I . . . . .  | 106 |
|         | II . . . . . | 107 |

| Avec addition de | 2 mg. | 5 mg. | 10 mg. |
|------------------|-------|-------|--------|
| Bo . . . . .     | 120   | 122   | 115    |
| F . . . . .      | 157   | 151   | 130    |
| As. . . . .      | 106   | 107   | 112    |
| I . . . . .      | 152   | 190   | 148    |
| Cr. . . . .      | 106   | 159   | 140    |
| Mn . . . . .     | 104   | 118   | 154    |
| Cu . . . . .     | 117   | 110   | 96     |
| Zn . . . . .     | 123   | 136   | 156    |
| Pb . . . . .     | 98    | 125   | 140    |

*Influence des phénomènes étudiés sur la réaction du sol. —* Je me suis demandé si la réaction du sol n'avait pas été sensiblement modifiée au cours de mon expérience. Pour le savoir, j'ai prélevé immédiatement après l'arrêt de cette dernière un échantillon de chacun des 29 lots mis en œuvre sur lequel j'ai déterminé le pH, selon la technique indiquée page 69. Cette détermination effectuée sur la terre fraîche m'a montré que *pour tous les lots le pH était identique à celui de la terre initiale, c'est-à-dire 6,9.*

CONCLUSIONS

L'examen des tableaux ci-dessus montre, tout d'abord, la remarquable concordance des témoins. Celle-ci est la preuve que l'expérience a été réalisée dans des conditions particulièrement satisfai-

santes (homogénéité parfaite des divers lots utilisés, bon fonctionnement de l'appareil imaginé). Les conclusions qui peuvent être déduites ont donc quelque valeur.

Les résultats obtenus, résumés dans les tableaux II et III, montrent d'abord avec certitude que *chaque oligo-élément ajouté a, dans le sol considéré, exalté la combustion de la matière organique et la nitrification*. Sur ces deux phénomènes microbiens et principalement sur la nitrification, l'action du fluor, de l'iode, du chrome, du manganèse a été particulièrement notable, celle du bore et du cuivre moindre. C'est ainsi que la quantité d'anhydride carbonique produite a été augmentée de 7 p. 100 environ avec F et I, de près de 9 p. 100 avec Cr, de 5 p. 100 avec Mn et seulement de 4 et 2 p. 100 avec Cu et Bo. L'augmentation du taux des nitrates a été respectivement de 47 (F), 79 (I), 50 (Cr), 45 (Mn), 15 (Bo), 10 (Cu) p. 100. L'arsenic a plutôt favorisé la combustion de la matière organique (17 p. 100 de CO<sup>2</sup> en plus), alors que le zinc et le plomb ont exercé leur influence surtout sur la nitrification (47 p. 100 de N nitrique en plus avec Zn ; 32 p. 100 avec Pb).

Cette action des « oligo-éléments » en ce qui concerne les doses employées, s'est manifestée souvent entre des limites très étroites. C'est ainsi par exemple, qu'en ce qui touche l'oxydation du carbone, 2 mg. d'arsenic ou de chrome par kilogramme de terre sèche ont eu un effet nul ou peu marqué alors qu'une dose de 5 mg. de ce métal-loïde ou de ce métal a exercé une influence notable ; 2 mg. de fluor ou de cuivre ont suffi pour accélérer la combustion de la matière organique tandis que 5 mg. de chacun de ces éléments ont produit déjà un effet moindre. Mais c'est surtout sur la nitrification où l'influence des « oligo-éléments » a été, on l'a vu, plus marquée que les différences apparaissent particulièrement nettes. On comparera notamment les quantités de N nitrique formées dans les lots ayant reçu respectivement différentes doses d'iode, de chrome, de manganèse, de zinc, de plomb. Cette action des diverses doses d'« oligo-éléments » incorporées au sol s'est exercée sur les deux phénomènes considérés dans le même sens, sauf cependant pour l'arsenic, l'iode et le zinc dont la quantité optimum a été différente, selon qu'il s'agissait de la combustion de la matière organique ou de la nitrification.

Les résultats du tableau I montrent d'autre part, que l'influence des « oligo-éléments » sur la combustion du carbone, si l'on compare les chiffres concernant ces derniers avec ceux fournis par les témoins, s'est manifestée essentiellement au début de l'expérience et pendant un temps relativement court (l'action du fluor, de l'iode, du chrome, du manganèse a été un peu plus prolongée), au moment où le phénomène considéré était le plus intense. Elle s'est ralentie et même ne s'est plus exercée lorsque l'activité de la combustion a diminué.

J'ai donné antérieurement [651] les raisons de la diminution d'intensité relativement rapide de cette combustion. Je les rappelle. J'estime qu'il faut les chercher très vraisemblablement dans l'évolution progressive de la matière organique vers l'état de « colloïdes humiques », état relativement stable, mais surtout, le milieu ne me

paraissant pas tellement appauvri en matière organique facilement décomposable, dans le fait que les micro-organismes avaient consommé presque entièrement les aliments immédiatement à leur portée. Ils ne pouvaient pour en trouver d'autres se déplacer aussi commodément dans le sol, milieu hétérogène et discontinu, que dans un liquide, comme l'ont expliqué naguère Th. SCHLÆSING [810 c] (1885) ainsi que mon regretté Maître Th. SCHLÆSING fils [901] (1924) et comme l'ont vérifié A. DEMOLON et G. BARBIER [902] (1931). Cette opinion peut d'ailleurs être appuyée par les expériences déjà anciennes de CORENWINDER [900] et les miennes plus récentes [651] citées précédemment, expériences montrant le redoublement de la combustion de la matière organique du sol par la trituration, par l'émiettement de ce dernier. Cet émiettement dissémine très vraisemblablement les micro-organismes en des endroits où ils trouvent de nouvelles ressources leur permettant de se développer et de « travailler » avec activité. Le fait a été aussi constaté dans la nitrification par Th. SCHLÆSING et A. MÜNTZ [802 a] (1879), P. DEHÉRAIN [903] (1893) et l'auteur de ce Mémoire.

Il est très probable que si j'avais pu au cours de mon expérience apprécier à *différents moments* la quantité de nitrates formée comme j'ai déterminé celle de  $\text{CO}_2$ , j'aurais observé également que les « oligo-éléments » agissaient surtout lorsque le phénomène de nitrification se manifestait avec le plus d'intensité.

A la fin de ces conclusions, je rappelle la remarque faite plus haut, à savoir, que la réaction du sol n'a pas été modifiée dans les différents lots pendant cette expérience.

---

## B. — « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET FIXATION DE L'AZOTE ATMOSPHÉRIQUE

---

### I

#### TRAVAUX ANTÉRIEURS

Ainsi qu'on l'a vu précédemment, la fixation microbienne de l'azote atmosphérique est réalisée dans les conditions naturelles par le *Bacterium radicicola*, bactérie symbiotique des racines des Légumineuses et éventuellement par certains microbes du sol, les *Azotobacter* notamment.

Dès la découverte de l'origine biologique de ce phénomène, l'action sur ce dernier des engrais « communs » et notamment celle des engrais azotés a été particulièrement étudiée. Si l'utilité pour l'activité du microbe des nodosités de la forme azotée organique a été tout de suite reconnue, par contre, celle de la forme minérale (surtout nitrique) a suscité depuis près de cinquante ans nombre de controverses. C'est ainsi, pour ne citer que quelques auteurs, que E. LAURENT [854, 2 et 3] (1890), E. MARCHAL [904] (1901), H. G. THORNTON et H. NICOL [905] (1934), A. DEMOLON et A. DUNNEZ [906] (1936-1940) ont montré l'action inhibitrice des nitrates alors que d'autres expérimentateurs comme W. A. ALBRECHT [907] (1920) ou H. BURGEVIN [908] (1933) observaient, au contraire, une influence peu sensible de l'azote nitrique. En ce qui concerne cependant les *Azotobacter*, cette forme d'azote intervient comme facteur limitant le développement des colonies (S. WINOGRADSKY [909 a] (1926-1928)). J. STOKLASA [910] (1911), R. H. CHRISTENSEN [911] (1915), A. CAUDA [912] (1916), H. NIKLAS, K. SCHARRER et A. STROBEL [913] (1926) notamment, ont mis d'autre part en évidence les importantes relations existant entre ces micro-organismes et le phosphore. E. LAURENT [854, 2 et 3] (1890) a montré le caractère indispensable dudit phosphore, du soufre, du potassium et du magnésium pour le développement du *Bacterium radicicola*. J. E. GREAVES [883, 914] (1922), comme il l'avait fait pour les microbes nitrificateurs, a examiné l'action d'un grand nombre de sels communs, dont certains employés comme engrais, sur le fonctionnement des microbes fixateurs d'azote. Il trouva qu'en général, les mêmes sels employés dans ses expériences étaient à des doses identiques moins toxiques pour les fixateurs d'azote que pour les nitrificateurs. Pour plus de détails concernant l'influence des engrais communs sur le phénomène considéré on consultera l'important Mémoire de cet auteur.

L'action de quelques « oligo-éléments » sur la fixation microbienne de l'azote a été étudiée par plusieurs chercheurs.

J. VOICU [886 a] (1923), opérant sur bouillon, a remarqué un effet heureux du bore (à la dose de 5 à 10 mg. pour 100 cm<sup>3</sup> du milieu) sur le *Bac. radicicola* du pois. Par contre, examinant l'influence du bore sur l'*Azotobacter chroococcum*, cultivé en milieu liquide, il constata que le métalloïde se montrait plus ou moins toxique pour le microbe, selon le milieu de culture utilisé. C'est ainsi que sur un milieu synthétique liquide contenant du glucose ou du saccharose, milieu où le développement du

microbe est médiocre, une dose de bore de 10 mg. p. 100 ne réduisait que relativement peu la quantité d'azote fixée comparativement au témoin. Par contre, si le milieu était additionné d'humus (en solution sodique) en très petites quantités, l'effet toxique du bore devenait très appréciable. Ce qui permettait d'affirmer, si les constatations étaient applicables au sol, que plus ce dernier contenait d'humus (favorable au développement de l'*Azotobacter*), plus l'effet toxique du bore était considérable, d'où diminution de la quantité d'azote fixée.

J. GREAVES [915] (1916) a effectué des cultures d'*Azotobacter* dans un sol sablo-argileux additionné de mannite et respectivement, de divers composés arsenicaux à des doses variant de 0 à 400 millionièmes.

Après incubation, il détermina l'azote total et constata que l'arséniate de soude (à une dose inférieure à 40 millionièmes) et le trisulfure d'arsenic notamment, augmentaient le pouvoir fixateur. Cependant, d'après l'auteur, l'arsenic et ses composés ne serviraient pas comme source d'énergie pour les *Azotobacter* mais leur action heureuse serait due plutôt à un effet inhibiteur de cet arsenic sur des espèces bactériennes nuisibles.

R. VON VEGESACK [308] (1937) ayant appliqué 0 g. 8 d'iodure de potassium sur une parcelle de 4 mq. cultivée en lupin, a constaté avec un plus grand nombre de nodosités une augmentation de la quantité d'azote fixée par les plantes comparativement à celle trouvée dans les témoins.

G. V. WENDT [300] antérieurement (1930), avait également observé une influence favorable de l'iode sur le développement des nodosités.

E. B. FRED [916] (1911) a trouvé que le bichromate de potassium et aussi le sulfate de cuivre (voir plus loin), en dilution suffisante, exerçaient une heureuse action sur la multiplication des *Azotobacter*.

Sur ces micro-organismes, H. KASERER [917] à peu près à la même époque (1910) constate l'effet favorable de 10 mg. de sulfate de manganèse p. 100 du milieu.

S. HERKE [918] (1913) observe le même effet utile du manganèse aux doses de 0,0001 à 0,01 p. 100, sur le *Bac. radicola* du lupin et de la serradelle.

D. OLARU (919) (1915) a confirmé cette utilité du métal pour le *Bac. radicola* du pois. 1/200.000 de manganèse, à l'état de sulfate, a provoqué une fixation d'azote vingt fois plus forte que celle du témoin. Dans d'autres expériences avec moins d'azote initial dans le bouillon de culture, les gains ont été quatre à cinq fois plus élevés que dans les témoins pour 1/50.000 de manganèse ajouté.

Le même auteur a expérimenté également le métal sur d'autres micro-organismes fixateurs d'azote [341 b] (1920). Il a trouvé que l'addition de manganèse avait été également favorable à l'activité de l'*Azotobacter chroococcum*. Pour une dose de Mn oscillant entre 1 et 2 mg. pour 100 cm<sup>3</sup> de la solution de mannite utilisée comme milieu, la quantité d'azote fixée par le micro-organisme avait été le double de celle du témoin. Expérimentant sur une terre de jardin additionnée de mannite, l'auteur constatait que la fixation de l'azote était nulle s'il n'ajoutait pas de manganèse. Elle atteignait par contre 30 mg. 8 lorsqu'il incorporait 0 mg. 5 Mn à 100 g. de terre. A des doses supérieures le métal se montrait toxique. Dans des expériences effectuées sur le *Clostridium Pastorianum* cultivé sur milieu d'OMELIANSKY, une addition de 1/1.000.000 de manganèse favorisa l'activité de ce micro-organisme (N gagné : témoin 100, avec Mn 133) mais des doses supérieures la diminuèrent.

A. G. ROCASOLANO [920] (1916) a effectué des expériences presque identiques. Utilisant le chlorure de manganèse, il expérimenta des doses croissantes de ce sel sur le *Bac. radicola* du trèfle, l'*Azotobacter chroococcum* et le *Clostridium Pastorianum*, cultivés sur bouillon mannité contenant une quantité d'azote connue. Après vingt-cinq jours d'incubation à 22-23° puis stérilisation, l'auteur dosa l'azote dans les milieux et constata que si le *Bac. radicola* fixait l'azote en l'absence de Mn, par contre les deux autres micro-organismes ne fonctionnaient pas quand le métal n'était pas présent.

Dans les trois cas, l'addition de manganèse accélérât la fixation de l'azote, la quantité optimum étant 0 g. 006 de Mn pour 100 cm<sup>3</sup> de bouillon. A des doses supérieures l'accélération diminuait et au-dessus de 0 g. 02 la fixation était retardée.

C. R. FELLERS [921] (1919), lui, n'observait qu'une très faible influence du manganèse sur la formation des nodosités du soja.

Etudiant l'action de diverses substances minérales sur le développement du *Bac. radicola*, E. LAURENT [854, 3] (1891) constatait que ce développement était entravé par l'addition au milieu de culture de 1 p. 1.000 de sulfate de cuivre ou de sulfate de zinc.

J. E. GREAVES [922] (1933) examinant les facteurs qui régissent la fixation de l'azote par l'*Azotobacter chroococcum* dans les milieux de culture de laboratoire, trouve que l'iode et le manganèse ajoutés à ces derniers favorisent beaucoup cette fixation de N par les micro-organismes considérés alors que le bore, le cuivre, le zinc ne sont pas utiles, les deux métaux employés en très faible quantité se montrant même très toxiques. C. R. BAIER [923] (1936), introduisant aussi des traces de cuivre et de zinc dans un milieu de culture pour *Azotobacter*, observe au contraire une influence favorable desdits métaux sur le développement des microbes fixateurs. T. F. MANNS, W. L. CHURCHMAN et M. M. MANNS [924] (1936) remarquent une augmentation du nombre de ces *Azotobacter*, lorsqu'un sel de zinc est incorporé au sol.

## II

### EXPÉRIENCES PERSONNELLES

Ainsi qu'on a pu le constater par la relation sommaire qui vient d'en être faite, les expériences déjà réalisées concernant l'influence des « oligo-éléments » sur la fixation microbienne de l'azote atmosphérique sont encore peu nombreuses, elles ne se rapportent qu'à quelques catalyseurs et certaines apparaissent nettement contradictoires. De plus, elles ont été généralement exécutées sur des milieux artificiels.

Il y avait intérêt, m'a-t-il semblé, à examiner de nouveau la question en l'envisageant sous un aspect à la fois plus général et plus réel. Je me suis donc proposé de rechercher quelles étaient les répercussions sur le phénomène biochimique considéré des neuf « oligo-éléments » dont j'avais étudié l'action sur la combustion de la matière organique et la nitrification, ces derniers *intervenant sur les microbes fixateurs d'azote dans leur habitat naturel*.

### MÉTHODE ADOPTÉE

L'obtention de résultats vraiment concluants impliquait, comme dans mes recherches précédentes, l'emploi d'une méthode rigoureuse pour observer la réaction de ces micro-organismes à l'égard des « biocatalyseurs ».

J'ai mesuré globalement l'activité de tous les microbes fixateurs d'azote en cultivant en vases et dans des conditions tout à fait

comparables, une Légumineuse et en dosant rigoureusement l'azote : 1° dans les sols avant culture et dans les graines initiales ; 2° dans les sols après culture et dans les récoltes. *La fixation de l'azote et son taux devaient ressortir de la comparaison entre les deux groupes de dosages.*

Cette méthode m'a semblé préférable à celle moins laborieuse qui comporterait seulement la comparaison des divers taux de N des récoltes obtenues avec catalyseurs par rapport à celui des témoins. Cette dernière technique laisserait subsister, en effet, une certaine incertitude, puisqu'elle négligerait notamment l'enrichissement plus ou moins important du sol en azote qui se produit toujours et aussi l'influence des « oligo-éléments » sur la nitrification, influence qui n'est pas négligeable, on l'a vu, et qui peut intervenir indirectement dans la nutrition azotée de la plante.

### DÉTAILS TECHNIQUES

Cette expérience étant celle même qui m'a permis de constater l'influence des « oligo-éléments » sur le développement du pois, on en trouvera les détails techniques (p. 67 à 87) dans la Partie du présent Mémoire consacrée à cette question.

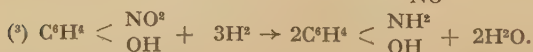
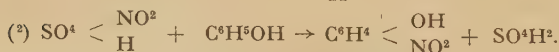
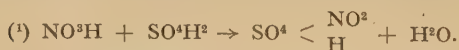
Le 26 juin, j'ai procédé à la récolte sur les 40 vases que comportait l'expérience. Je rappelle qu'il y avait sept plantes dans chaque vase. Sur la totalité de chacune des différentes parties de ces plantes (racines lavées, tiges et feuilles, gousses vidées, graines) séchées à + 100-105° et pesées, et pour chaque lot, j'ai dosé l'azote total selon la technique décrite ci-après.

J'ai prélevé soigneusement après la culture un échantillon de chaque sol, sur lequel j'ai dosé immédiatement et séparément l'azote organique et ammoniacal par la méthode de KJELDAHL et l'azote nitrique par la méthode de A. Th. SCHLÆSING, en opérant exactement de la même manière que pour l'analyse de la terre initiale. Pour les détails d'application de ces méthodes, on se reportera à mon *Guide pour l'étude expérimentale du sol* déjà cité (voir p. 69). Les dosages effectués plusieurs fois sur le même échantillon ont été particulièrement concordants.

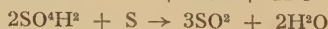
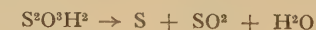
*Dosage de l'azote total dans les graines initiales et dans les récoltes.* — Il importait, on le conçoit, pour établir des bilans ayant quelque valeur, de doser rigoureusement l'azote total dans les graines initiales et dans les récoltes obtenues. Le choix de la méthode à utiliser avait donc une certaine importance, celle-ci devant être à la fois particulièrement précise comme je viens de le dire et assez rapide, vu le nombre des dosages à effectuer. Ce nombre était, en effet, de l'ordre de 160, du fait de ma décision de déterminer l'azote sur la totalité de chacune des différentes parties des lots récoltés, cela non seulement pour éviter un échantillonnage de la récolte entière assez hasardeux malgré le soin apporté, mais aussi pour pouvoir, ainsi que je l'ai dit précédemment, examiner l'influence des « oligo-éléments » sur la qualité de cette récolte (exprimée par la teneur en N des graines) et également suivre de plus près les actions étudiées. Je ne pouvais donc songer, vu sa durée, à utiliser la méthode de DUMAS qui eût été évidemment la méthode de choix en la circonstance. Je ne pouvais, non plus, employer la méthode de KJELDAHL telle qu'elle est appliquée habituellement puisqu'il me fallait tenir compte de la présence très vraisemblable, dans certains organes tout au moins, de nitrates en quantité non négligeable

(le rapport de l'azote nitrique à l'azote total dans les végétaux peut, d'après A. DEMOLON [789 a], atteindre parfois 20 p. 100). Cet auteur écrit d'ailleurs dans son important ouvrage *Croissance des végétaux cultivés* [789 b] (1941) : « La présence d'une quantité de nitrates qui, très souvent, n'est pas négligeable, ne permet pas d'utiliser la méthode KJELDAHL sans modifications. Le procédé par réduction de l'ion nitrique au moyen de l'alliage de DEWARDA en milieu alcalin est inapplicable aux substances végétales du fait de la présence de tannins qui entravent la transformation en ammoniacale. » A. DEMOLON, bien que donnant sa préférence, comme moi-même d'ailleurs, à la méthode de DUMAS, préconise la technique suivante : « On traite à froid 1 g. de matière séchée par 20 cm<sup>3</sup> d'acide sulfurique additionné de 50 g. d'acide salicylique par litre. On laisse en contact une demi-heure, on ajoute 3 g. d'hyposulfite de soude pour réduire les combinaisons nitrées et on continue comme à l'ordinaire. » C'est en somme la vieille méthode de P. FÆRSTER [787] (1889), légère variante de la méthode de JOLDBAUER [925] (1886) déjà conseillée par J. KÖNIG [926] (1910) et par G. KLEIN [927] (1933) qui est ainsi recommandée.

On sait que dans ce procédé de JOLDBAUER, le nitrate est transformé en nitro-phénol quand on le met en présence d'acide phénol-sulfurique, la réduction est ensuite obtenue par l'hydrogène naissant résultant de l'action de l'acide sulfurique sur de la poudre de zinc, en présence de quelques gouttes d'une solution de chlorure de platine à 4 p. 100 comme catalyseur. Cette réduction peut d'ailleurs s'effectuer en milieu simplement sulfurique, le noyau aromatique la catalysant, d'après le schéma suivant, comme l'ont montré d'ailleurs W. MESTREZAT et MARTHE Paul JANET [928] (1921), puis H. LEVALTIER [929] (1924).



FÆRSTER combine l'action de l'acide phénol-sulfurique ou plus exactement celle de l'acide sulfurique additionné d'acide salicylique à celle du thiosulfate de sodium dont la destruction des molécules, au sein de l'acide sulfurique, provoque un processus de réduction intense, les réactions suivantes entrant en jeu :



A ce mélange, l'addition de mercure préconisée par l'auteur conduit de plus, lors de la dissolution du métal dans l'acide sulfurique, à la formation d'anhydride sulfureux dont l'action s'ajoute à celle du thiosulfate.

C'est cette méthode de FÆRSTER que j'ai donc employée pour le dosage de l'azote total dans les matières végétales que j'avais à examiner. Je l'ai appliquée de la façon suivante : la *totalité* de la partie des plantes considérée pour chaque lot<sup>1</sup>, séchée, était introduite dans un matras de KJELDAHL en verre Pyrex avec 30 cm<sup>3</sup> d'acide sulfurique contenant 50 g. d'acide salicylique par litre. Je laissais en contact une heure et demie. J'ajoutais ensuite 3 g. de thiosulfate de sodium. Je couvrais et après agitation j'abandonnais jusqu'au lendemain, le matras étant placé dans un bain d'eau froide. Après ce contact, j'ajoutais ensuite une grosse goutte de mercure et je continuais le dosage selon KJELDAHL, en suivant la technique habituelle (chauffage jusqu'à décoloration, distillation après

1. Un échantillon de 1 g. 500 pour les graines initiales, le dosage étant effectué plusieurs fois.

addition d'hypophosphite de sodium et de lessive de soude, etc.).  $\text{NH}^3$  était recueilli dans l'acide sulfurique N/10, sauf lorsqu'il s'agissait des graines, dans lequel cas j'utilisais l'acide N/2. Il me paraît inutile d'ajouter que, bien qu'utilisant des réactifs particulièrement purs, j'effectuais souvent des dosages à blanc sur ces derniers, afin de tenir compte d'un apport toujours possible de traces de  $\text{NH}^3$  par lesdits réactifs ou l'eau distillée utilisée.

Avant cependant d'appliquer cette méthode de FÖRSTER à l'étude que j'avais entreprise je me suis livré avec elle à certaines vérifications. Celles-ci consistaient à doser l'azote total dans divers mélanges constitués respectivement par un composé organique bien défini auquel était ajoutée une dose déterminée d'un nitrate (N nitrique introduit oscillait comme dans certains organes végétaux entre 13 et 23 p. 100 environ du N total). Le tableau ci-après résume ces essais :

|                                                                                                                                                         | MÉLANGES                      |                                        |                                       |                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                         | Urée<br>(51 mg.)<br>+ nitrate | Asparagine<br>(100 mg. 8)<br>+ nitrate | Glycocolle<br>(99 mg. 4)<br>+ nitrate | Albumine<br>d'œufs<br>(300 mg. 3)<br>+ nitrate |
|                                                                                                                                                         | mg.                           | mg.                                    | mg.                                   | mg.                                            |
| N initial de la substance<br>(déterminé par un dosage<br>spécial)                                                                                       | 23,66                         | 18,45                                  | 18,34                                 | 36,08                                          |
| N nitrique ajouté (2 cm <sup>3</sup><br>d'une solution de $\text{NO}^3\text{K}$<br>contenant 9 g. 968 de sel<br>pur et fondu dans 500 cm <sup>3</sup> ) | 5,52                          | 5,52                                   | 5,52                                  | 5,52                                           |
| N total de la prise d'essai.                                                                                                                            | 29,18                         | 23,97                                  | 23,86                                 | 41,60                                          |
| N total retrouvé (par la mé-<br>thode FÖRSTER) . . . .                                                                                                  | 28,98                         | 23,80                                  | 23,72                                 | 41,81                                          |
| N total retrouvé p. 100.                                                                                                                                | 99,3                          | 99,2                                   | 99,4                                  | 100,5                                          |

Ces chiffres satisfaisants montrent que la technique dont j'envisageais l'utilisation pouvait convenir dans le cas où une certaine quantité d'azote nitrique aurait été présente dans les matières végétales examinées.

## RÉSULTATS OBTENUS

Les tableaux suivants groupent, rapportés à la matière de chaque vase :

I. Les résultats exprimés en grammes, des dosages d'azote (N organique et ammoniacal, N nitrique) effectués sur plusieurs échantillons du sol avant culture, sur les sols après culture des quatre lots témoins et les quantités moyennes<sup>1</sup> d'azote correspondant à chacun des sols ayant reçu une dose donnée d'un « oligo-élément ».

II. Les quantités d'azote total exprimées en milligrammes, trouvées : 1° dans sept graines initiales ; 2° dans les différentes

1. Pour la clarté de ce tableau et des suivants, seules y figurent, en ce qui concerne les lots ayant reçu une dose donnée d'un « oligo-élément », les moyennes des résultats obtenus dans des essais identiques. Les écarts entre ces résultats n'ont pas dépassé 1,5 p. 100, précision satisfaisante dans une expérience d'un tel développement.

parties des sept plantes récoltées (issues de graines identiques).

III. Le bilan de l'azote dans l'expérience réalisée, bilan établi conformément au programme de cette dernière (voir p. 128) et comportant, exprimée en grammes, la quantité d'azote total trouvée dans l'ensemble : sol avant culture + graines et dans chaque ensemble : sol après culture + plantes récoltées, l'augmentation constatée dans ce dernier ensemble correspondant à la quantité d'azote fixée par celui-ci.

I

**Azote dans le sol** (de chaque vase)  
(en g.)

|                                                                              |                    | N organique<br>et ammoniacal | N nitrique<br>(moyenne) | N total                |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|
|                                                                              |                    | g.                           | g.                      | g.                     |
| a) Avant culture                                                             |                    |                              |                         |                        |
| 1.—                                                                          |                    | 8,183                        |                         | 8,404                  |
| 2.—                                                                          |                    | 8,189                        | 0,221                   | 8,410                  |
| 3.—                                                                          |                    | 8,198                        |                         | 8,419                  |
|                                                                              |                    |                              |                         | moyenne : <b>8,411</b> |
| b) Après culture (les sols contiennent inévitablement des débris de racines) |                    |                              |                         |                        |
| Témoins :                                                                    | 1 <sup>er</sup> .. | 8,240                        | 0,075                   | 8,315                  |
|                                                                              | 2 <sup>e</sup> ..  | 8,236                        | 0,070                   | 8,306                  |
|                                                                              | 3 <sup>e</sup> ..  | 8,236                        | 0,071                   | 8,307                  |
|                                                                              | 4 <sup>e</sup> ..  | 8,230                        | 0,070                   | 8,300                  |
|                                                                              |                    |                              |                         | moyenne : <b>8,307</b> |
| Avec addition par kg. de terre sèche, de :                                   |                    |                              |                         |                        |
| Bo                                                                           | 2 mg.              | 8,370                        | 0,120                   | <b>8,490</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,411                        | 0,117                   | <b>8,528</b>           |
| F                                                                            | 2 mg.              | 8,381                        | 0,123                   | <b>8,504</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,430                        | 0,153                   | <b>8,583</b>           |
| As                                                                           | 2 mg.              | 8,323                        | 0,084                   | <b>8,407</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,252                        | 0,123                   | <b>8,375</b>           |
| I                                                                            | 2 mg.              | 8,321                        | 0,117                   | <b>8,438</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,528                        | 0,141                   | <b>8,669</b>           |
| Cr                                                                           | 2 mg.              | 8,324                        | 0,131                   | <b>8,455</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,291                        | 0,149                   | <b>8,440</b>           |
| Mn                                                                           | 2 mg.              | 8,433                        | 0,113                   | <b>8,546</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,473                        | 0,128                   | <b>8,601</b>           |
| Cu                                                                           | 2 mg.              | 8,320                        | 0,106                   | <b>8,426</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,456                        | 0,148                   | <b>8,604</b>           |
| Zn                                                                           | 2 mg.              | 8,428                        | 0,130                   | <b>8,558</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,291                        | 0,139                   | <b>8,430</b>           |
| Pb                                                                           | 2 mg.              | 8,286                        | 0,140                   | <b>8,426</b>           |
|                                                                              | 5 mg.              | 8,386                        | 0,146                   | <b>8,532</b>           |

II

**Azote dans les Graines initiales et dans les Plantes récoltées**

(N total en mg. pour chaque vase)

a) *N dans les sept graines initiales* (poids total : 1 g. 575)

1° 54 mg. 6 } moyenne :  
2° 55 mg. 4 } **55 mg. 0**

b) *N dans les sept plantes récoltées*

|                                                             | Racines | Tiges<br>et feuilles | Gousses | Graines | Plantes<br>entières    |
|-------------------------------------------------------------|---------|----------------------|---------|---------|------------------------|
|                                                             | mg.     | mg.                  | mg.     | mg.     | mg.                    |
| Témoins : 1 <sup>er</sup> . . .                             | 9,9     | 62,4                 | 12,6    | 102,3   | 187,2                  |
| 2 <sup>e</sup> . . .                                        | 10,1    | 63,3                 | 12,8    | 99,2    | 185,4                  |
| 3 <sup>e</sup> . . .                                        | 9,7     | 62,6                 | 12,4    | 99,7    | 184,4                  |
| 4 <sup>e</sup> . . .                                        | 9,8     | 61,9                 | 12,7    | 100,7   | 185,1                  |
|                                                             |         |                      |         |         | moyenne : <b>185,5</b> |
| Avec addition par<br>kg. de terre suppo-<br>sée sèche, de : |         |                      |         |         |                        |
| Bo { 2 mg. . . . .                                          | 13,3    | 58,2                 | 10,3    | 106,6   | <b>188,4</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 8,1     | 67,3                 | 14,1    | 106,8   | <b>196,3</b>           |
| F { 2 mg. . . . .                                           | 11,2    | 55,3                 | 12,8    | 126,1   | <b>205,4</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 10,8    | 66,1                 | 15,2    | 125,4   | <b>217,5</b>           |
| As { 2 mg. . . . .                                          | 11,9    | 59,4                 | 12,8    | 114,8   | <b>198,9</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 11,3    | 61,0                 | 12,4    | 114,2   | <b>198,9</b>           |
| I { 2 mg. . . . .                                           | 10,9    | 61,9                 | 12,9    | 112,0   | <b>197,7</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 10,7    | 68,8                 | 15,7    | 117,5   | <b>212,7</b>           |
| Cr { 2 mg. . . . .                                          | 12,1    | 63,8                 | 12,5    | 123,7   | <b>212,1</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 10,5    | 64,0                 | 10,8    | 110,0   | <b>195,3</b>           |
| Mn { 2 mg. . . . .                                          | 10,8    | 58,2                 | 14,7    | 115,2   | <b>198,9</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 11,1    | 70,6                 | 14,8    | 100,3   | <b>196,8</b>           |
| Cu { 2 mg. . . . .                                          | 10,3    | 62,7                 | 16,0    | 114,7   | <b>203,7</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 9,9     | 50,7                 | 15,0    | 115,0   | <b>190,6</b>           |
| Zn { 2 mg. . . . .                                          | 10,4    | 57,6                 | 18,6    | 104,2   | <b>190,8</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 12,7    | 55,8                 | 11,6    | 117,4   | <b>197,5</b>           |
| Pb { 2 mg. . . . .                                          | 8,8     | 56,8                 | 15,5    | 111,3   | <b>192,4</b>           |
| 5 mg. . . . .                                               | 10,5    | 48,2                 | 12,0    | 111,6   | <b>182,3</b>           |

III

**Bilan de l'Azote dans l'expérience réalisée**

N total (moyenne) en g. pour chaque vase

*Avant culture*

| N TOTAL DANS |             |               |
|--------------|-------------|---------------|
| Sol          | Graines     | Sol + graines |
| g.<br>8,411  | g.<br>0,055 | g.<br>8,466   |

*Après culture*

|                                                    | N TOTAL DANS     |         |               | N FIXÉ<br>CALCULÉ |
|----------------------------------------------------|------------------|---------|---------------|-------------------|
|                                                    | Sol <sup>1</sup> | Plantes | Sol + plantes |                   |
|                                                    | g.               | g.      | g.            | g.                |
| Témoins (moyenne de 4 essais) . . . . .            | 8,307            | 0,185   | 8,492         | <b>0,026</b>      |
| Avec addition par kg. de terre supposée sèche, de: |                  |         |               |                   |
| Bo { 2 mg. <sup>2</sup> . . . . .                  | 8,490            | 0,188   | 8,678         | <b>0,212</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,528            | 0,196   | 8,724         | <b>0,258</b>      |
| F { 2 mg. . . . .                                  | 8,504            | 0,205   | 8,709         | <b>0,243</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,583            | 0,217   | 8,800         | <b>0,334</b>      |
| As { 2 mg. . . . .                                 | 8,407            | 0,199   | 8,606         | <b>0,140</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,375            | 0,199   | 8,574         | <b>0,108</b>      |
| I { 2 mg. . . . .                                  | 8,438            | 0,198   | 8,636         | <b>0,170</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,669            | 0,213   | 8,882         | <b>0,416</b>      |
| Cr { 2 mg. . . . .                                 | 8,455            | 0,212   | 8,667         | <b>0,201</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,440            | 0,195   | 8,635         | <b>0,169</b>      |
| Mn { 2 mg. . . . .                                 | 8,546            | 0,199   | 8,745         | <b>0,279</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,601            | 0,197   | 8,798         | <b>0,332</b>      |
| Cu { 2 mg. . . . .                                 | 8,426            | 0,204   | 8,630         | <b>0,164</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,604            | 0,191   | 8,795         | <b>0,329</b>      |
| Zn { 2 mg. . . . .                                 | 8,558            | 0,191   | 8,749         | <b>0,283</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,430            | 0,198   | 8,628         | <b>0,162</b>      |
| Pb { 2 mg. . . . .                                 | 8,426            | 0,192   | 8,618         | <b>0,152</b>      |
| 5 mg. . . . .                                      | 8,532            | 0,182   | 8,714         | <b>0,248</b>      |

1. Y compris débris de racines.

2. Deux essais pour chaque dose d'oligo-élément.

## CONCLUSIONS

L'examen des chiffres trouvés pour les témoins et figurant dans les tableaux I et II montre avant tout, la concordance étant satisfaisante, la bonne marche de l'expérience réalisée. D'ailleurs, les chiffres correspondant (pour les lots ayant reçu une dose donnée d'un « oligo-élément ») à des essais identiques ne s'écartant pas de 1,5 p. 100, ainsi que je l'ai dit p. 131, confirmeraient s'il en était besoin l'allure régulière de ladite expérience. Les résultats obtenus permettent donc de faire avec quelque certitude les observations suivantes :

1<sup>o</sup> Bien qu'une certaine partie ait été « nitrifiée » et assimilée par les plantes, la quantité d'azote organique et ammoniacal existant dans les sols cultivés est, *pour tous les lots*, supérieure à celle renfermée dans le même sol avant culture. H. HELLRIEGEL et H. WILFARTH [829] (1888) avaient aussi observé dans leurs célèbres expériences un enrichissement du sol en azote, après culture, ce dernier s'étant accumulé sous forme organique. Th. SCHLÖSING fils et E. LAURENT [832] (1890-1892) dans leurs expériences non moins célèbres avaient également constaté ce fait. Cet enrichissement peut-il être attribué à une fixation directe par le sol ou bien provient-il d'une excrétion possible d'azote par les racines de la Légumineuse ? S. et H. WINOGRADSKY [930] (1936) ont décelé un dégagement d'ammoniac libre par les nodosités, qu'ils considèrent comme un phénomène général accompagnant la fixation de N, l'origine de cet azote ammoniacal étant vraisemblablement atmosphérique. A. I. VIRTANEN et S. V. HAUSEN [931] avaient aussi, un peu antérieurement (1935), observé une excrétion de composés azotés par les nodosités des Légumineuses, ces composés consistant principalement en amino-acides ne provenant pas de la dissociation des protéides des nodosités. Ce qui faisait dire aux auteurs, que la fixation de N se réalisait à la surface des cellules bactériennes dans la nodosité et que les composés azotés ainsi formés étaient, utilisés par la plante-hôte et d'autre part, diffusaient dans le sol. G. BOND [932] (1938), R. E. SHAPTER [933] (1939), par contre, n'ont pas constaté d'excrétion d'azote par les racines des Légumineuses. Ayant obtenu des résultats tantôt positifs et tantôt négatifs dans des essais effectués dans des conditions identiques, P. W. WILSON et J. C. BURTON [934] (1938) estiment que si cette excrétion ne peut être mise en doute, les facteurs sont insuffisamment connus et le phénomène n'est pas reproductible avec certitude. Faut-il attribuer aussi, pour une bien faible part d'ailleurs, ce gain trouvé à une partie non utilisée de l'azote préexistant dans les graines ou de celui appartenant aux débris de racines subsistant inévitablement dans les sols. Je ne me prononcerai pas sur cette origine. Je dirai simplement que ces quantités d'azote organique et ammoniacal plus élevées dans les sols après culture et assez variées pour

les différents lots permettent d'envisager déjà (sans s'en référer aux dosages effectués sur les plantes et aux comparaisons des ensembles sol-graines et sol-plantes) une influence des « oligo-éléments » sur le phénomène considéré. Mais ces chiffres, je le souligne, sont insuffisants pour conclure d'une façon sûre à cette influence.

2° La quantité de N nitrique subsistant dans les sols après culture a été (malgré l'apport d'une fraction de N organique nitrifiée) nécessairement moins élevée que celle existant dans la terre initiale, en raison de l'utilisation préférentielle de cette forme d'azote par les plantes. On remarquera que dans les sols-témoins et dans un sol ayant reçu de l'arsenic, cette quantité restante est moins importante que dans les autres lots. Faut-il supposer une assimilation plus grande des nitrates par les plantes développées sur ces sols ? Je ne le pense pas, le coefficient d'utilisation étant vraisemblablement du même ordre pour tous les lots. Il me semble plus logique d'admettre une nitrification moins intense de ces sols dont l'enrichissement en azote organique et ammoniacal paraît avoir été aussi moins important. Cette interprétation s'accorde d'ailleurs avec les résultats trouvés dans mon expérience montrant l'influence des « oligo-éléments » sur la nitrification (voir p. 123).

3° La quantité d'azote dans les plantes entières, si elle était envisagée isolément et bien qu'il faille tenir compte de l'augmentation due à l'excédent de rendement, laisserait prévoir l'influence favorable des « oligo-éléments » sur la fixation de l'azote par les Légumineuses. Elle ne la démontrerait pas absolument pour les raisons indiquées p. 129. C'est pourquoi je n'ai pas cru devoir présenter un tableau montrant l'enrichissement en N total p. 100 de matière sèche des plantes récoltées. A titre seulement documentaire, on pourra se reporter aux chiffres figurant p. 101 qui expriment le taux en N des graines p. 100 de matière sèche.

4° *Les chiffres figurant sur le tableau III exprimant les quantités d'azote pour les ensembles : 1° sol avant culture + graines, 2° sol après culture + plantes récoltées, doivent être uniquement considérés pour la déduction de conclusions définitives, ainsi que je l'ai fait observer précédemment.*

*La comparaison de ces ensembles permet de constater une fixation d'azote atmosphérique pour tous les lots. Cette fixation a été nettement plus marquée pour ceux correspondant à une dose donnée d'un « oligo-élément ». Si elle a été seulement quatre fois plus élevée avec une dose de 5 mg. d'arsenic par kilogramme de terre, elle a été multipliée par 16 avec 5 mg. d'iode, par 12 avec 5 mg. de fluor, de manganèse, de cuivre, par 11 avec 2 mg. de zinc.*

Cependant, cet enrichissement en azote de l'ensemble sol + plantes n'est pas très considérable par rapport à la quantité d'azote préexistant dans le sol, peut-être parce que celui-ci était initialement bien pourvu en cet élément, quoique W. A. ALBRECHT [907] (1920) n'ait pas trouvé de relation entre l'azote

préexistant dans un sol et la quantité fixée. Mais l'accord satisfaisant des chiffres obtenus d'une part dans les témoins, d'autre part dans chacun des vases d'un même groupe<sup>1</sup> fait que les résultats paraissent expérimentalement assurés et la conclusion valable. *La fixation de l'azote atmosphérique a bien été augmentée par l'addition au sol considéré d'une petite dose de l'un quelconque des éléments étudiés*, celle de 5 mg. par kilogramme de terre sèche, paraissant généralement la plus favorable dans l'expérience réalisée.

## EXAMENS COMPLÉMENTAIRES

*Réaction des sols après culture.* — A la fin de mon expérience sur la combustion de la matière organique et la nitrification, je m'étais préoccupé d'un changement possible de la réaction des échantillons de terre mis en œuvre. J'ai eu le même souci dans cette étude de la fixation de l'azote. Aussi, immédiatement après la récolte, ai-je prélevé un échantillon du sol de chaque vase sur lequel j'ai déterminé le *pH* selon la technique indiquée p. 69. Opérant comme à l'ordinaire sur la terre fraîche, j'ai constaté que *le pH n'avait subi aucune modification depuis le début de l'expérience* et cela pour tous les lots. Il était resté partout fixé à 6,9. La variation saisonnière généralement observée (R. CHAMINADE [935]) ne s'était donc pas produite ou avait été bien peu marquée. Il est vrai que l'expérience avait seulement duré deux mois et trois semaines.

*Examen des racines des plantes récoltées.* — Il m'a semblé utile d'examiner les racines des plantes obtenues dans mon expérience afin d'observer l'influence exercée par les divers « oligo-éléments » non seulement sur le développement de ces organes souterrains mais aussi, et surtout, sur celui des nodosités qu'ils portaient.

Ainsi que je l'ai dit précédemment (p. 87), après la récolte des parties aériennes des plantes cultivées dans chaque vase, j'ai extrait leurs racines subsistant dans la terre de ce dernier. Il est à peine besoin de faire remarquer que de grandes précautions ont été nécessaires pour effectuer le mieux possible cette opération. Malgré les difficultés de celle-ci, j'ai pu recueillir des systèmes radiculaires assez complets. J'ai comparé ceux ayant été en contact avec les « oligo-éléments » à ceux des lots-témoins. Malgré la perte inévitable de poils radicaux et peut-être même de radicelles cette comparaison présentait, je crois, quelque intérêt.

Après lavage avec grand soin de ces racines, j'ai pu observer d'abord que *toutes celles correspondant à des plantes cultivées dans un même pot avaient un développement assez identique*. En outre, *celles recueillies dans chacun des pots correspondant à une même*

---

1. Je rappelle que le tableau III ne consigne pas tous les résultats, mais indique seulement les chiffres moyens pour chaque groupe.

dose d'un oligo-élément donné étaient aussi à peu près semblables. Cette ressemblance, en même temps qu'elle constituait une preuve supplémentaire de la bonne marche de l'expérience réalisée, permettait d'observer dans des conditions assez satisfaisantes l'influence des « oligo-éléments » sur les organes souterrains.

Mieux que tout commentaire, l'examen des photographies ci-après (pl. VII à XI) donnera une idée de cette influence.

Pour la commodité de la présentation ne figurent sur ces photographies que les racines de deux plantes de chaque vase sur les sept que comportait l'ensemble d'un lot. Les racines non reproduites, appartenant aux cinq autres plantes, étaient à très peu près semblables, ainsi que je l'ai dit ci-dessus, aux deux systèmes représentés.

Afin de faciliter leur montage, ces racines ont été desséchées, ce qui leur confère sur les vues ci-après une apparence un peu grêle. Ce manque de vérité en ce qui concerne la grosseur était nécessaire pour mieux mettre en évidence l'ensemble de ces parties souterraines, but recherché. Le papier millimétrique servant de fond à ces dernières renseigne sur les longueurs atteintes.

Ces photographies montrent que d'une façon générale, les « oligo-éléments » incorporés au sol ont contribué aussi, dans l'expérience réalisée, au développement du système racinaire. Ce fait est particulièrement visible pour les racines développées dans les sols ayant reçu respectivement 2 mg. de bore, 2 et 5 mg. de fluor, d'arsenic, de chrome, 5 mg. de manganèse, de cuivre et surtout 5 mg. de zinc par kilogramme de terre sèche.

Ces observations peuvent être rapprochées de celles du même ordre faites sur d'autres plantes par divers auteurs, notamment H. AGULHON [68 c] (1910) avec le bore, W. E. BRENCHLEY [403] (1910), B. E. GILBERT et F. E. PEMBER [404] (1931), J.-P. MARTIN [406] (1935), F. C. GERRETSEN [407] (1937) avec le manganèse, T.-F. MANNS, W. L. CHURCHMAN et M. MANNS [924] (1936) avec le cuivre et le zinc. Par contre, elles diffèrent de celles faites avec l'arsenic par R. COBET [281] (1919), L. SCHMITT [284] (1930), W. B. ALBERT et Ch. ARNDT [285] (1931).

Les racines des plantes récoltées sur les sols-témoins et même sur les sols pourvus d'un « catalyseur » étaient, en général, peu riches en nodosités, fait qui s'accorde d'ailleurs avec la faible quantité d'azote fixée par les divers lots. Faut-il voir là une conséquence de la richesse en N nitrique de la terre utilisée ?

Cependant, bien que lesdites nodosités (peu visibles sur les photographies présentées) ne soient guère abondantes, elles étaient néanmoins assez nombreuses sur les organes souterrains développés dans les sols ayant reçu respectivement 2 et 5 mg. d'iode, de manganèse, de zinc et de plomb, par kilogramme de terre sèche.

La remarque faite pour l'iode corrobore d'ailleurs celles de G. V. WENDT [300] (1930) et de R. VON VEGESACK [308] (1937) concernant le même élément, remarques mentionnées précédemment (voir p. 127).

*Richesse en Azotobacter des sols après culture.* — Ainsi qu'il a été dit précédemment, la fixation de l'azote atmosphérique peut être éventuellement réalisée dans les conditions naturelles par les *Azotobacter*. D'après S. WINOGRADSKY [909 a] (1928), c'est de la présence et de l'état d'activité de ces micro-organismes que dépend en premier lieu le *pouvoir fixateur* d'une terre:

J'ai pensé qu'il y avait quelque intérêt à examiner comment avaient vraisemblablement réagi ces microbes fixateurs dans les sols mis en œuvre dans mon expérience de culture (sols-témoins et sols pourvus d'une dose donnée d'un « oligo-élément »). Sans entreprendre de grands travaux microbiologiques, la méthode des plaques de terre moulée due à S. WINOGRADSKY [909] (1926) était susceptible de me renseigner sur la densité des *Azotobacter* dans les divers sols après culture<sup>1</sup>. Ce procédé était sans doute moins parfait que celui du même auteur, utilisant des grandes plaques (20 cm. de diamètre) de silico-gel électif ensemencées avec 1 g. de l'échantillon de terre et permettant d'évaluer (après seulement quarante-huit heures d'un séjour à 30°) le nombre de colonies existantes et aussi (par un dosage effectué après un temps suffisant, en général cinq jours) le gain d'azote réalisé.

Il me semblait cependant convenable pour donner une idée de l'action exercée par les « oligo-éléments » étudiés. Cette méthode des plaques de terre moulée est, en effet, particulièrement frappante puisqu'elle permet de faire apparaître des *Azotobacter* sous forme de colonies visibles à l'œil nu. De plus, elle a l'avantage très appréciable d'être simple et rapide. Elle est basée sur ce fait que « dans une terre normale bien aérée, l'apport de matières hydrocarbonées très diverses, non accompagné d'une augmentation du taux de l'azote assimilable, ne fait pulluler que des microbes cocciformes reconnaissables comme des *Azotobacter*, tandis que tout le reste du peuplement microbien demeure à l'état de repos ». L'amidon en poudre est le glucide préconisé dans ce cas, comme matière énergétique, par S. WINOGRADSKY, car la fermentation qui se produit immédiatement dans une plaque mannitée ou glucosée provoque des boursouffures et des craquelures qui gênent l'apparition des colonies; avec l'amidon la plaque reste intacte pendant plusieurs jours.

---

1. On sait que le procédé habituel pour mettre en évidence les microbes considérés, consistait jusqu'aux expériences de WINOGRADSKY en l'ensemencement avec quelques grammes de terre du liquide de BEIJERINCK (solution à 2 p. 100 de mannite, additionnée de phosphate de potassium et quelquefois de carbonate de calcium). Un voile brun indiquait la présence des micro-organismes fixateurs. D'autre part, le gain d'azote trouvé dans le même milieu additionné de 10 p. 100 de terre et ayant séjourné à l'étuve pendant un certain temps, indiquait le pouvoir fixateur de la terre. Une telle méthode donnait des résultats essentiellement variables, car elle était le plus souvent sous la dépendance de phénomènes anaérobies (fermentation butyrique) difficiles à éviter et qui enrayaient généralement le développement des microbes recherchés.

Une autre technique, due à H. CHRISTENSEN [911] (1915), était basée sur le processus de décomposition de la mannite incorporée au sol. On suivait sa marche au moyen d'un titrage par le permanganate, effectué tous les cinq jours. Mais, en réalité, on ne savait rien de précis sur le parallélisme existant entre la mannite détruite et l'azote fixé. Il est très vraisemblable que celui-ci était fonction du régime azoté des sols dont les variations sont bien connues.

Pour mettre en évidence les *Azotobacter* dans les sols ayant servi à mon expérience de culture, j'ai suivi exactement la technique indiquée par S. WINOGRADSKY [909] (1926)<sup>1</sup> et reproduite dans mon *Guide pour l'étude expérimentale du sol* [652 l]. Je résume brièvement ci-après les opérations effectuées.

Après la récolte des plantes, j'ai prélevé immédiatement dans chaque vase un échantillon de terre fraîche (75 g.) auquel j'ai incorporé 5 p. 100 (soit 3 g. 750) d'amidon de maïs pulvérisé. J'ai ensuite ajouté de l'eau bi-distillée en petites portions et j'ai pétri la masse de manière à la rendre plastique, en évitant tout excès d'eau (7 cm<sup>3</sup> 5 de cette dernière m'ont seulement été nécessaires en raison de l'humidité gardée par la terre). J'ai ensuite introduit cette pâte dans une boîte de PÉTRI de 10 cm. de diamètre et j'ai poli le mieux possible la surface avec une spatule de porcelaine humectée d'eau. A titre comparatif, j'ai préparé de façon identique deux plaques avec la terre avant culture et, comme témoins, deux plaques de la même terre, sans amidon (30 cm<sup>3</sup> d'eau m'ont été nécessaires pour la confection de chacune). J'ai couvert ces boîtes avec leur couvercle respectif de manière cependant que l'air puisse pénétrer facilement et celles-ci ont été placées dans une étuve maintenue à 30°, où je les ai laissées pendant quarante-huit heures. J'ai ensuite découvert lesdites boîtes et j'ai immédiatement constaté sur la surface des plaques l'apparition des petites colonies de 1-2 mm. hyalines ou blanchâtres décrites par S. WINOGRADSKY. Après un examen microscopique confirmant que ces dernières étaient bien composées d'*Azotobacter*, j'ai prolongé de vingt-quatre heures, le séjour des boîtes à l'étuve. Au bout de ce temps, j'ai photographié les colonies.

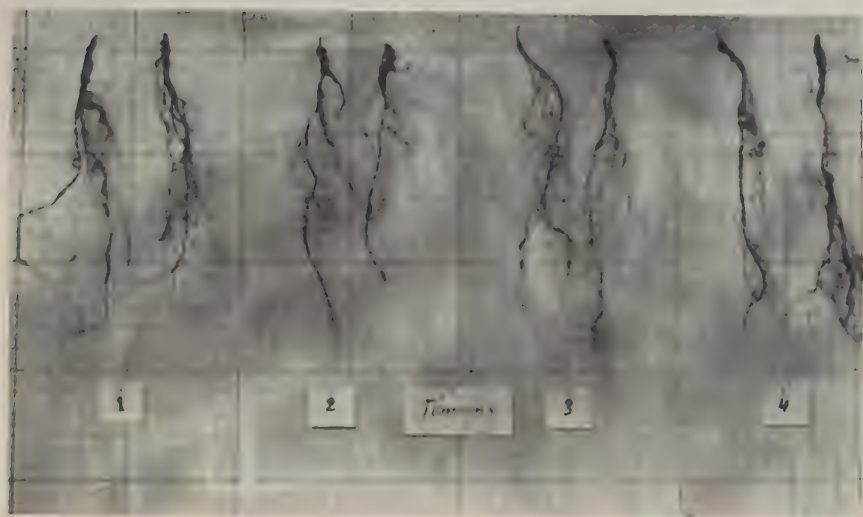
Les vues ont été reproduites ci-après (pl. XII à XV). J'ai pensé en effet que, mieux que des chiffres résultant d'une numération assez aléatoire, elles donneraient, but proposé, une idée sommaire de la densité des *Azotobacter* dans les sols considérés.

Après cette photographie, et dans les jours qui ont suivi, ces colonies se sont étendues et ont fini par couvrir la surface de la terre de taches brunes caractéristiques. Bien qu'elles soient peu visibles en raison de la couleur même de la terre, riche en matière organique, on aura un aspect de ces taches sur les photographies 33, 34, 35, 36 correspondant à l'influence du zinc. Par suite d'un oubli malheureux, ces reproductions ainsi que celles portant les nos 37, 38, 39, 40 ont été faites une journée après les précédentes. Elles n'en sont pas moins instructives.

Les photographies ci-après, rappelant les constatations faites directement, montrent d'abord qu'aucune colonie n'est apparue dans la terre non additionnée d'amidon. Elles ne montrent guère de différence entre la richesse en microbes fixateurs de la terre initiale (bien que ces vues ne soient pas très bonnes) et celle de la terre cultivée. Peut-être après un examen très attentif pourrait-on néanmoins observer pour cette dernière une très légère augmentation du nombre des micro-organismes, ce qui confirmerait les constatations récentes de J. E. GREAVES et A. F. BRACKEN [936] (1939). Ces auteurs ont trouvé le pouvoir fixateur plus élevé dans un sol cultivé (en luzerne) que dans le même sol vierge et pensent que cette augmentation de la fixation non symbiotique serait due à

1. Sauf que j'ai employé des boîtes de Pétri de 10 cm. de diamètre au lieu de 5 cm.

INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 (2 ET 5 MGR. PAR KGR. DE TERRE SUPPOSÉE SÈCHE)  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*racines*)



A. — Témoin



B. — Bonin



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*racines*)  
(suite)



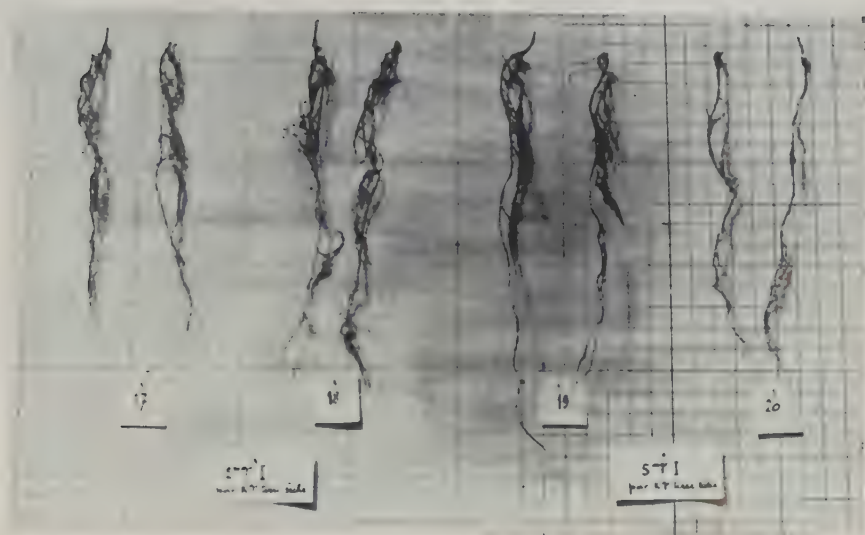
C. — FLUORINE



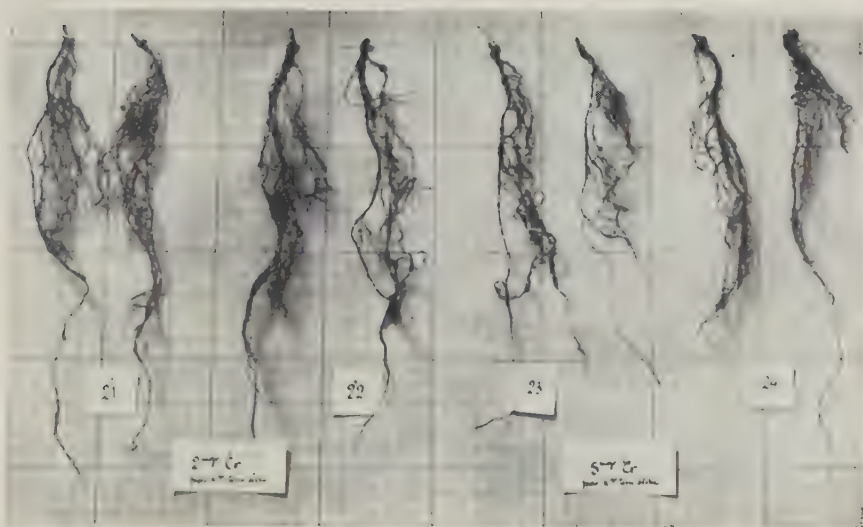
D. — ARSENIC



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*racines*)  
 (suite)



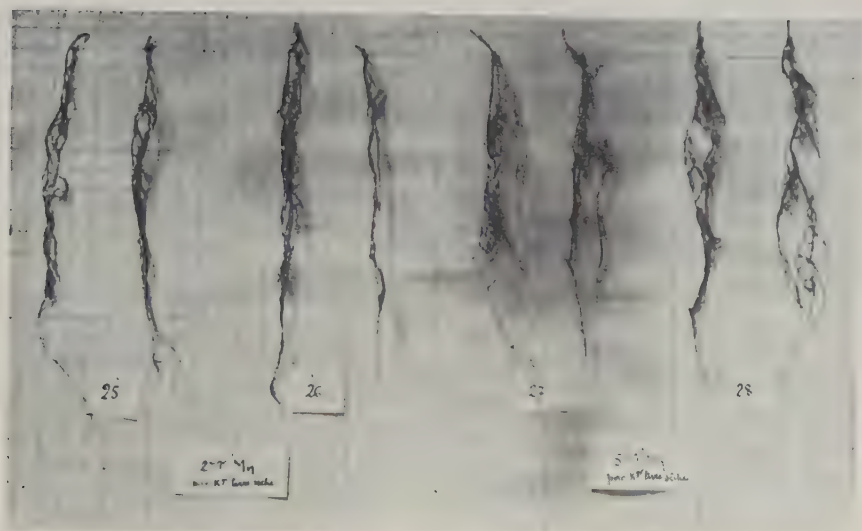
E. — IODE



F. — CHROME



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (*racines*)  
(suite)



G. — MANGANÈSE.



H. — CUIVRE



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
SUR LE DÉVELOPPEMENT DU POIS (racines)  
(fin)



I. — ZINC



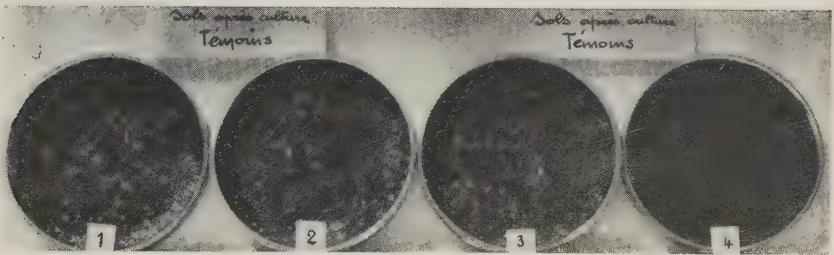
J. — PLOMB



INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 (2 ET 5 MGR. PAR KGR. DE TERRE SUPPOSÉE SÈCHE)  
 SUR LA RICHESSE EN AZOTOBACTER DU SOL (*après culture*)



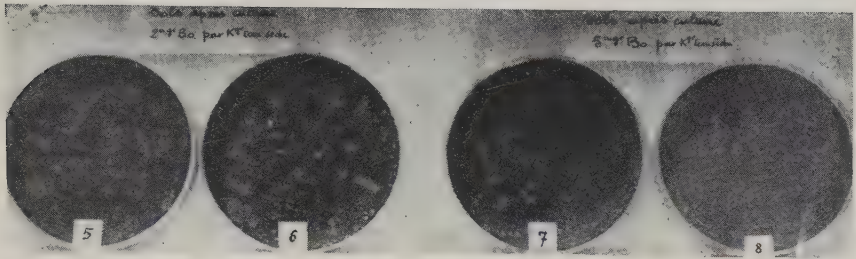
a) Terre avant culture, sans amidon  
 b et c) Terre avant culture, avec amidon



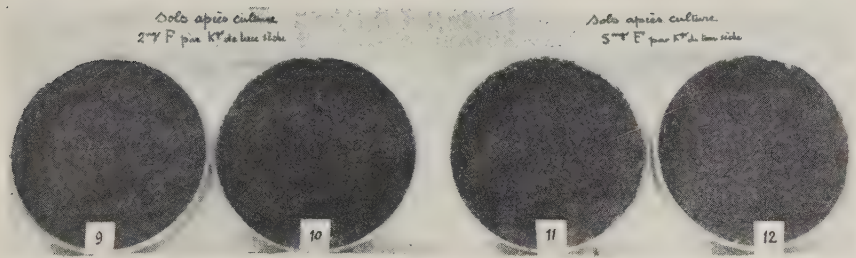
A. — TÉMOINS



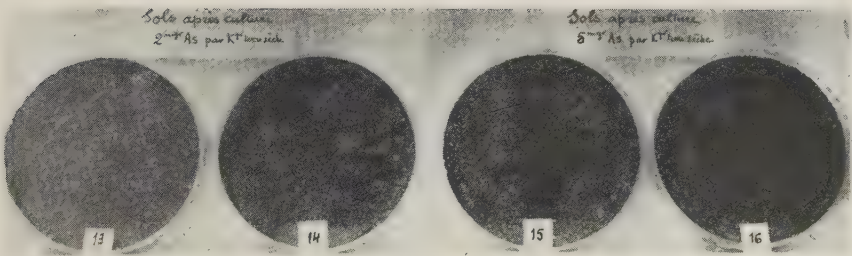
INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LA RICHESSE EN *Azotobacter* DU SOL (après culture)  
 (suite)



B. — BORE



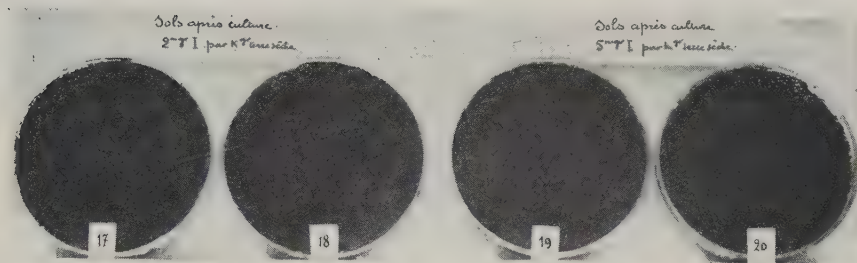
C. — FLUOR



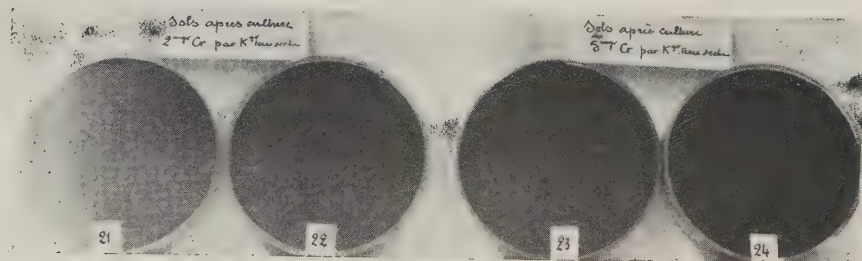
D. — ARSENIC



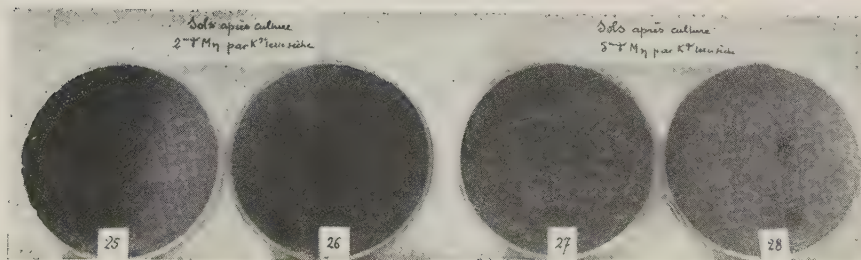
INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LA RICHESSE EN *Azotobacter* DU SOL (après culture)  
 (suite)



E. — IODE



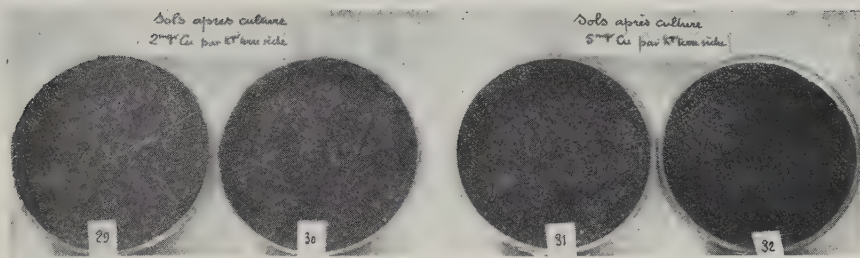
F. — CHROME



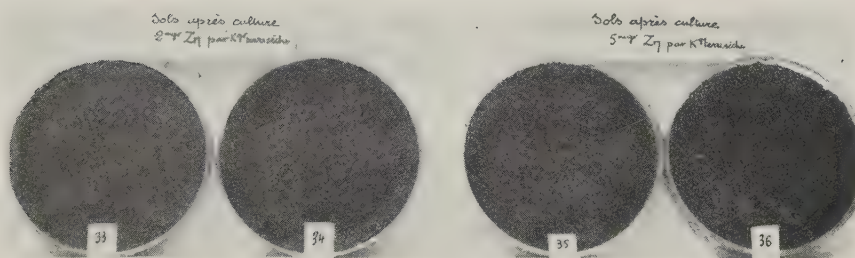
G. — MANGANÈSE



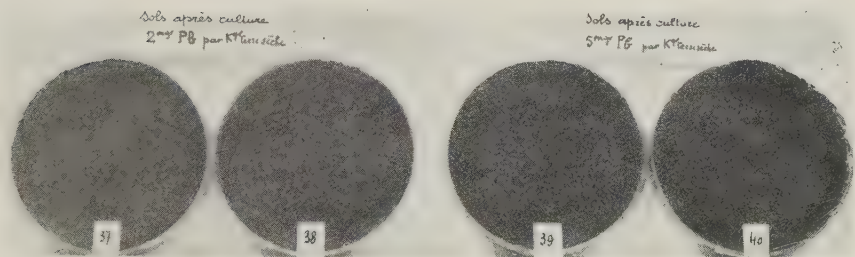
INFLUENCE DE QUELQUES « OLIGO-ÉLÉMENTS »  
 SUR LA RICHESSE EN *Azotobacter* DU SOL (après culture)  
 (fin)



H. — CUIVRE



I. — ZINC



J. — PLOMB



ce fait que la plante, utilisant l'azote soluble du sol, oblige les fixateurs à utiliser l'azote de l'air ou encore à ce que la végétation fournit aux micro-organismes une source d'énergie de nature hydrocarbonée.

Les photographies annexées montrent malheureusement mal le meilleur développement des colonies, par rapport aux témoins, que j'ai observé directement sur les plaques correspondant à un apport de 5 mg. de manganèse et 2 mg. de zinc, par kilogramme de terre sèche. Il y a là une confirmation, dans le milieu naturel, de certaines constatations précédemment mentionnées, notamment celles de D. OLARU et de A. G. ROCASOLANO (voir p. 127) en ce qui concerne l'influence du manganèse, et celles de C. R. BAIER, de T. F. MANNS, W. L. CHURCHMAN et M. M. MANNS (voir p. 128) en ce qui concerne l'influence du zinc sur les *Azotobacter*.

Les vues présentées montrent surtout l'entrave au développement de ces micro-organismes qui commence à se produire dans la terre utilisée, riche en matière organique, lorsqu'on lui ajoute 5 mg. de bore, 2 ou 5 mg. de fluor, d'iode, de chrome, de plomb, 5 mg. de cuivre par kilogramme. En ce qui touche l'action du bore, on se reportera aux expériences de J. VOICU (p. 126) dont les résultats obtenus sur milieu artificiel s'apparentent aux observations que j'ai effectuées sur la terre elle-même. Contrairement aux remarques antérieures de J. E. GREAVES (p. 000), il n'apparaît pas dans mon expérience que l'arsenic ait exercé une action très marquée sur les *Azotobacter*.

Les résultats numériques que j'ai obtenus montrent, heureusement, que les « oligo-éléments » ne se sont pas comportés de la même manière à l'égard du *Bac. radicola*. Pour certains d'entre eux, le fait, on l'a vu, a déjà été constaté, dans des conditions différentes, par d'autres auteurs.

## CONCLUSIONS RELATIVES

### A L'ENSEMBLE DES PHÉNOMÈNES MICROBIENS ÉTUDIÉS

---

Des expériences décrites dans cette Troisième Partie, expériences se rapportant à trois phénomènes microbiens de grande importance agronomique : combustion de la matière organique, nitrification, fixation de l'azote atmosphérique, il résulte que *tous les « oligo-éléments » étudiés : bore, fluor, arsenic, iode, chrome, manganèse, cuivre, zinc, plomb, ont exalté ces phénomènes.* Cette action a été plus marquée sur la nitrification et la fixation de l'azote. Si l'on considère les maxima obtenus, on constate en effet, que la production des nitrates a été dans le cas où elle était la plus considérable ( 5 mg. d'iode par kilogramme de terre) multipliée par 1,7 par rapport à celle des témoins et que le gain d'azote le plus élevé, du fait de la fixation microbienne, a correspondu à 16 fois celui desdits témoins, pour le lot ayant reçu également 5 mg. d'iode par kilogramme de terre. Par contre, la quantité d'anhydride carbonique produite, traduisant la combustion de la matière organique, a seulement été multipliée par 1,08 pour le sol où l'effet a été le plus notable (lot ayant reçu 5 mg. Cr par kilogramme de terre).

Certains éléments ont donné à la fois aux trois phénomènes considérés une activité particulièrement intense : tels le fluor et surtout l'iode pour les métalloïdes, tels le manganèse et aussi le chrome et le zinc pour les métaux. L'action du bore et de l'arsenic, sans être négligeable, a été plus modérée. Ces comparaisons ne sont pas d'ailleurs absolues puisqu'il faudrait tenir compte ainsi que je l'ai dit précédemment, de la masse atomique et de la valence des éléments.

En ce qui concerne l'influence des quantités expérimentées, c'est d'une façon générale, sur ces phénomènes microbiens comme sur le développement de la plante, entre des limites très étroites que l'effet favorable s'est produit. L'action du cuivre et du plomb est à cet égard typique.

Le cas du plomb apparaît assez particulier dans mes expériences. Toxique à petite dose, ce métal intervient de façon heureuse, lorsque la quantité mise en œuvre est déjà assez forte. Ce fait est analogue à ceux observés avec le même métal par C. B. LIPMAN et P. S. BURGESS et se rapportant à l'activité des microbes nitrificateurs (voir p. 116), par L. NEIPP [937] (1937) en ce qui touche la multiplication du bacille pyocyanique. Il ne semble d'ailleurs pas inutile de faire un rapprochement entre l'action « accélératrice » exercée par les « oligo-éléments » sur des microbes jouant un rôle agronomique et celle produite par ces catalyseurs sur d'autres micro-organismes. A titre

d'exemple, je citerai seulement ici l'action « stimulante » du manganèse observée sur la fermentation acétique par G. BERTRAND et R. SAZERAC [938] (1913), sur la fermentation lactique par A. ZLATAROFF et D. KALTSCHewa [939] (1936) et aussi sur la croissance du bacille tuberculeux par T. MADSEN et M. NYMAN [940] (1907).

Il y a entre ces observations et les miennes un parallélisme qui n'a sans doute rien de surprenant mais qui mérite néanmoins d'être considéré attentivement.

---



## *RÉSUMÉ*

### *ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES*

---

Les travaux de Gabriel BERTRAND et de ses élèves ayant nettement démontré l'utilité des « oligo-éléments » dans la nutrition des plantes, l'introduction de ces derniers dans la pratique agricole comme engrais « catalytiques » ne semblait devoir soulever aucune objection puisqu'elle était la conclusion logique des expériences réalisées. Un certain scepticisme a cependant été manifesté par nombre d'agronomes, sur l'efficacité réelle des substances préconisées. Celui-ci a très vraisemblablement pour origine, la divergence des résultats obtenus dans une multitude d'essais effectués en pots ou au champ, divergence provenant le plus souvent de conditions expérimentales défectueuses et notamment de la trop grande quantité d'élément utilisée.

J'ai pensé qu'il y avait intérêt à reprendre avec quelque rigueur l'étude de cette influence des « oligo-éléments » sur le développement des plantes, en envisageant, non seulement ceux dont l'utilité paraissait bien établie comme le bore, le manganèse, le zinc, mais aussi certains dont le rôle était moins connu, tels le fluor, l'arsenic, l'iode, le chrome, le cuivre, le plomb.

Cette étude, à mon sens, devait être entreprise dans des conditions assez proches des conditions naturelles et devait avoir en même temps la précision d'un travail de laboratoire. Mais un semblable projet nécessitait fatalement pour sa bonne réalisation nombre d'opérations dont quelques-unes fort laborieuses, surtout si l'on voulait examiner le problème avec certaines de ses incidences. Étudié par un seul chercheur avec des moyens modestes comme c'était le cas, le sujet devait être inévitablement limité, vu l'ampleur des expériences à entreprendre.

J'ai dû me résigner, pour mener à bien ma tâche, à ne considérer que l'action d'un très petit nombre de doses, mais convenablement choisies, des « oligo-éléments » précitées, action exercée sur une seule plante se développant sur un seul sol. C'était évidemment singulièrement restreindre la portée de l'étude envisagée, mais j'ai pensé qu'effectuée avec un certain souci de précision, cette dernière pouvait conduire néanmoins à des conclusions susceptibles d'être généralisées.

M'étant proposé d'examiner en même temps le rôle des catalyseurs sur la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, j'ai expérimenté sur une Légumineuse, le pois. J'ai cultivé cette plante en vases, sur un sol de jardin initialement riche en matières organiques, maintenu partout en le même état physique et le même état

d'hydratation, additionné respectivement de 2 et de 5 mg., par kilogramme de terre sèche, de l'un des éléments mentionnés plus haut.

Je ne reviendrai pas ici sur les détails techniques de l'expérience de culture que j'ai réalisée. Je rappellerai seulement brièvement les conclusions que j'ai pu déduire de ladite expérience intermédiaire entre l'expérience de laboratoire et l'essai au champ :

*Tous les « oligo-éléments » ajoutés ont produit, par rapport au témoin, un excédent de matière végétale (seul le plomb a eu plutôt un effet dépressif). Cet excédent sans être considérable a été cependant très appréciable (il a oscillé entre 2,6 et 13 p. 100) et tout à fait en dehors des erreurs expérimentales.*

*En général, l'action favorable s'est manifestée sur toutes les parties de la récolte. Parfois cependant, elle s'est exercée plutôt sur le développement de la graine : c'est le cas du bore (2 mg.), du fluor (2 et 5 mg.), du manganèse (2 mg.) et surtout du zinc à la dose de 5 mg. par kilogramme de terre sèche.*

*La quantité d'« oligo-élément » ajoutée a eu une influence considérable sur la récolte totale ou sur les différentes parties de cette dernière. Tantôt une dose de 2 mg. par kilogramme de terre a été utile, alors qu'une de 5 mg. a été plutôt dépressive (bore). Tantôt un apport de 2 mg. a eu peu d'effet alors qu'un de 5 mg. s'est montré particulièrement efficace (zinc).*

*Cette expérience confirme non seulement certains résultats déjà acquis en ce qui concerne les « catalyseurs » précités souvent étudiés, mais elle montre de plus, que l'action d'éléments peu connus tels l'arsenic, l'iode, le chrome sur le développement de la plante entière, le cuivre et même le plomb sur la production des graines, mérite d'être examinée très attentivement, cette action, ainsi que je l'ai montré, étant loin d'être négligeable.*

Mais le rendement pondéral ne doit pas seulement être envisagé par le producteur de matière végétale, agriculteur ou horticulteur. Celui-ci doit se préoccuper également de la « qualité » de la récolte.

L'influence des « oligo-éléments » se fait-elle sentir sur cette qualité qui, dans le cas du pois, peut s'exprimer par la teneur des graines en matières protéiques (légumine notamment) ? Dans mon expérience j'ai examiné aussi cette question, des dosages rigoureux d'azote pour l'étude d'un autre problème relatée ci-après m'en donnant d'ailleurs l'occasion.

*J'ai constaté que, dans la grande majorité des cas, les « oligo-éléments » aux doses fournies (2 et 5 mg. par kilogramme de terre sèche) avaient élevé le taux d'azote des graines récoltées. Dans deux cas (2 mg. I, 2 mg. Cr) il n'y avait pas eu variation ; dans deux (2 mg. Bo, 5 mg. Zn) il y avait eu diminution. L'augmentation ne fut, en général, jamais considérable (de 4 à 7 p. 100), mais elle s'éleva néanmoins aux environs de 10 (2 et 5 mg. F) et 12 (2 mg. Pb) p. 100 et atteignit même 14 p. 100 (2 mg. As), ce qui est très appréciable surtout si l'on songe que la graine est l'organe de la plante le plus difficile à modifier dans son équilibre chimique. Cette amélioration de la qualité paraît être en rapport inverse avec le rendement, les taux*

d'azote un peu plus élevés étant généralement rencontrés dans les graines dont le rendement pondéral était un peu plus faible (le cas du zinc est particulièrement typique).

Gabriel BERTRAND ayant fait remarquer naguère que lorsqu'on ajoute une substance fertilisante à un sol, celle-ci n'agit pas uniquement sur la plante dont on veut augmenter la récolte, mais encore sur les micro-organismes existant dans ce sol, je me suis demandé, pour compléter mes observations, si les « oligo-éléments » étudiés exerçaient aussi une action sur les principaux phénomènes microbiens dont le sol considéré était le siège : combustion de la matière organique, nitrification, fixation de l'azote atmosphérique, cette dernière s'effectuant par le *Bac. radicola* des racines des Légumineuses et éventuellement par d'autres micro-organismes tels les *Azotobacter* du sol.

J'ai institué pour l'étude des deux premiers phénomènes une expérience spéciale comportant un dispositif entièrement original, tandis que pour l'examen du troisième j'ai profité de mon expérience de culture effectuée à dessein avec une Légumineuse. J'ai fait usage dans ces recherches de techniques rigoureuses décrites dans le présent Mémoire, la grande précision de ces dernières permettant seule de conclure avec certitude.

Sur les trois phénomènes microbiens considérés, j'ai constaté que tous les « oligo-éléments » précités avaient exercé une action excitatrice. Celle-ci a cependant été plus marquée sur la nitrification et la fixation de l'azote, l'intensité du premier phénomène ayant été multipliée par 1,7 et celle du second par 16, comparativement aux témoins, là où cette excitation a été la plus notable (ces maxima ont été produits dans les deux cas avec une dose de 5 mg. d'iode par kilogramme de terre). L'activité de la combustion de la matière organique a été moins modifiée puisqu'elle a seulement été multipliée par 1,08, par rapport aux témoins, avec 5 mg. de chrome par kilogramme de terre (effet maximum).

J'ai observé également que les trois phénomènes étudiés avaient été simultanément « exaltés » de façon appréciable surtout par l'iode et le manganèse, mais aussi à un degré moindre par le chrome et le zinc, cette observation n'ayant pas d'ailleurs un caractère absolu puisqu'elle ne se rapporte pour une fin pratique qu'au poids de l'élément ajouté sans tenir compte de sa masse atomique et de sa valence.

En ce qui concerne l'importance de la dose expérimentée, il apparaît que, pour chaque oligo-élément, l'influence excitatrice de cette dernière s'est exercée entre des limites très étroites, tout comme sur le développement de la plante.

D'ailleurs, d'une façon générale, de même que mes résultats qui se rapportent à l'activité de micro-organismes jouant un rôle agronomique peuvent être rapprochés de ceux trouvés par d'autres chercheurs avec des microbes d'un caractère différent, mes observations concernant le « monde invisible » du sol peuvent être rapprochées de celles que j'ai faites sur une plante supérieure ayant subi l'action des mêmes « catalyseurs ». Cette dernière confrontation

confirmerait, s'il en était besoin, la si judicieuse remarque de Gabriel BERTRAND évoquée ci-dessus.

L'ensemble de mes recherches justifie aussi — mais est-ce encore bien utile ? — une autre remarque de ce Maître [941] (1938) montrant l'intérêt qu'il y aurait parfois à ajouter aux engrais chimiques concentrés à base exclusive d'azote, de phosphore, de potassium, mais « trop purs », que l'industrie tend aujourd'hui à fabriquer de plus en plus, quelques-uns de ces « oligo-éléments » dont, dans un cas particulier, je crois avoir démontré également l'utilité.

De plus, mes recherches font apparaître l'absolue nécessité d'examiner très attentivement les réserves des sols en ces « infiniment petits chimiques » et surtout, lorsque le perfectionnement des techniques le permettra, d'évaluer le stock facilement mobilisable de ces derniers, stock se trouvant très vraisemblablement conditionné par une « mécanique chimique » dont l'étude s'imposera tout comme s'impose l'étude de celle qui assure la mise à la disposition des plantes du phosphore ou du potassium.

Ces considérations me conduisent d'ailleurs à faire observer que mes expériences sur les « oligo-éléments » m'ont donné l'occasion d'utiliser, de vérifier, d'adapter même, diverses méthodes pour la détermination de ces derniers dans les sols. *Certaines de ces méthodes m'ont permis de déceler dans une terre commune des éléments comme le chrome et le plomb, encore peu étudiés de façon systématique.*

Les différentes conclusions qui viennent d'être énoncées étant déduites essentiellement de *résultats numériques*, je ne ferai que citer dans ce résumé de caractère général, car les résultats n'en sont que « visuels », l'étude que j'ai faite de l'influence des « oligo-éléments » sur la richesse du sol en *Azotobacter*.

De même, je mentionnerai seulement ici mes essais concernant l'action des « biocatalyseurs » sur la germination des graines du pois ou sur le développement des racines de cette plante et de leurs nodosités.

---

## BIBLIOGRAPHIE

---



# BIBLIOGRAPHIE

## INTRODUCTION

### *Nutrition minérale des végétaux et « Oligo-éléments »*

#### GÉNÉRALITÉS

1. BERNARD PALISSY, *Œuvres*, publiées d'après les textes originaux avec une notice historique et bibliographique et une table analytique, par Anatole France. Charavay, édit., Paris, 1880. a) p. 298 ; b) p. 300 ; c) p. 43 ; d) p. 27.
2. J. B. DUMAS, *Leçons de Chimie professées en 1860 à la Société Chimique*, in-8°. Hachette, édit., Paris, 1861, p. 294.
3. TH. DE SAUSSURE, *Recherches chimiques sur la végétation*. Vve Nyon, libr., Paris, 1804, p. 261 et 262 ; a) p. 25 et 217 ; b) p. 179 ; c) p. 206.
4. J. WOODWARD, *Philosophical Transactions*, **21**, 1699, p. 193.
5. J. LIEBIG, *Chimie organique appliquée à la Physiologie végétale et à l'Agriculture*, traduction faite sur les manuscrits de l'auteur par Ch. Gerhardt ; Fortin, Masson et Cie, édit., Paris, 1841. a) p. 1 ; b) p. 5 ; c) p. 172 ; d) p. 177. L'édition originale publiée en 1840 (in-8°, Brunswick) porte le titre : *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*.
6. J. B. DUMAS, *Essai de Statique chimique des êtres organisés* (Leçon professée à l'Ecole de Médecine, le 20 août 1841, rédigée en commun avec J. B. Boussingault). Fortin, Masson et Cie, édit., 2<sup>e</sup> édit., Paris, 1842, p. 34.
7. W. WIEGMANN et L. POLSTORFF, *Über die anorgan. Bestandteile der Pflanzen*. Göttinger, 1842.
8. L. POLSTORFF, *Ann. der Chem. und Pharm.*, **62**, 1847, p. 192.
9. J. B. BOUSSINGAULT, *C. R. Acad. Sc.*, **6**, 1838, p. 102 et **7**, 1838, p. 889 ; *Ann. des Sc. Natur.*, 2<sup>e</sup> série, **10** (Bot.), 1838, p. 257.
10. J. B. BOUSSINGAULT, *C. R. Acad. Sc.*, **41**, 1855, p. 845-857 ; *Ann. Sc. Natur.*, 4<sup>e</sup> série, **4** (Bot.), 1855, p. 32-46 ; *Agron., Chim. agric. et Phys.*, 2<sup>e</sup> édit., **1**, p. 166. Mallet-Bachelier, impr., Paris, 1860.
11. SALM-HORSTMAR, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, **32**, 1851, p. 508 ; **5**, 1852, p. 60. *Vers. über die Nahrung der Pflanz. Braunschweig*, 1856, p. 26 et 34. Les travaux résumés dans cet écrit ont été publiés dans le *Journ. f. prakt. Chem.*, **46**, 1849, jusqu'à **64**, 1855.
12. G. VILLE, *C. R. Acad. Sc.*, **45**, 1857, p. 996 et **47**, 1858, p. 438 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, **49**, 1857, p. 171 et 215.
13. H. L. DUHAMEL DU MONGEAU, *Physique des arbres*, 1758, 1<sup>re</sup> partie, et *Naturgesch. d. Bäume*, 1765, vol. II, p. 160.
14. HASENFRATZ, *Ann. de Chim. et de Phys.*, **13**, 1792.
15. J. SACHS, *Wien Akad.*, **26**, 1858, p. 331 ; *Landw. Versuchs. Stat.*, **2**, 1860, p. 22 et 224.
16. W. KNOP, *Landw. Versuchs. Stat.*, **2**, 1860, p. 65 et 270 ; *Ibid.*, **3**, 1861, p. 295.
17. F. STOHMANN, *Landw. Versuchs. Stat.*, **4**, 1862, p. 65 et **6**, 1864, p. 347.
18. F. NOBBE et Th. SIEGERT, *Landw. Versuchs. Stat.*, **4**, 1862, p. 318 ; **5**, 1863, p. 116 ; **6**, 1864, p. 19.
19. E. WOLFF, *Landw. Versuchs. Stat.*, **8**, 1866, p. 189.
20. J. RAULIN, *Etudes chimiques sur la végétation* (thèse Fac. Sc., Paris, 1870, publiée dans *Ann. Sc. Natur.*, 5<sup>e</sup> série, **11**, 1869), nouv. édit. Masson et Cie, édit., Paris, 1905, p. 54 ; a) p. 104 ; b) p. 168 ; c) p. 158 et suiv.
21. L. PASTEUR, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, **64**, 1862, p. 109.
22. BUTKEWITSCH, *Russ. Journ. exp. Landw.*, **10**, 1909, p. 136, anal. dans *Jahresber. über d. Forsch. der Agrikultur Chem.*, **12**, 1909, p. 484.
23. H. NIKLAS, H. POSCHENRIEDER et J. TRISCHLER, *Ernährung der Pflanze*, **26**, 1930, p. 97 et *Centralbl. f. Bakter.*, II, **81**, 1930, p. 298.
24. E. G. MULDER, *Thèse de Doctorat*, Veenman, Wageningen, 1938 ; *Ann. des Ferment.*, **4**, 1938, p. 513.
25. G. BERTRAND, *Rev. Gén. des Sc. pures et appl.*, **16**, 1905, p. 451.

26. G. BERTRAND, *C. R. du VIII<sup>e</sup> Congrès Intern. Chim. appl.* (New-York), **28**, 1912, p. 30 et *Ann. Inst. Pasteur*, **26**, 1912, p. 852.
27. G. BERTRAND, *Rapport présenté au VI<sup>e</sup> Conseil de Chimie de l'Inst. intern. de Chim. Solvay*, Bruxelles, octobre 1937, publié dans *Ann. des Ferment.*, **4**, 1938, p. 65.
28. J. SACHS, *Physiologie végétale*, traduit de l'allemand par M. Micheli. Masson, édit., Paris, 1868, p. 126 ; a) *Ibid.*, p. 134.
29. G. BERTRAND, *Encyclopédie française*, **4**, 1936, fasc. X, p. 1.
30. G. BERTRAND, *Bericht. V intern. Kongr. f. angew. Chem.*, Berlin (2-8 juin 1903), **3**, p. 839 ; *Chemiker Zeitung*, **27**, 1903, n<sup>o</sup> 49, p. 613.
31. G. BERTRAND : *C. R. VII<sup>e</sup> Congrès intern. Chim. appl.*, Londres, 1909, sect. VII, p. 159 et 167.
32. TRINCINETTI, *Bot. Zeit.*, 1845, p. 111.
33. P. P. DEHÉRAIN, *Ann. Agron.*, **4**, 1878, p. 321.
34. P. MAZÉ, *Ann. Inst. Pasteur*, **28**, 1914, p. 21.
- 34 bis D. BERTRAND, *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **22**, 1940, p. 60 ; *Recherches sur le Vanadium dans les sols et les plantes*, thèse de Doctorat, Fac. Sc., Paris, Jouve et Cie, édit., Paris, 1941.

#### OLIGO-ÉLÉMENTS

##### *Présence dans les engrais et dans les produits phyto-pharmaceutiques*

BORE (et As, I, Cr, Mn, Cu, Zn, Pb)

35. F. W. DAFERT, *Monatsh. Chem.*, **29**, 1908, p. 235 ; résumé dans *Journ. Chem. Soc. Ind.*, **27**, 1908, p. 684.
36. F. E. HANCE, *Hawaiian Sugar Planters Assoc. Proc.* **53** rd. Ann. Meeting, 1933, p. 46.
37. R. BRECKPOT, *IV<sup>e</sup> Congrès Intern. techn. chim. ind. agric.* (Bruxelles), **2**, 1935, p. 382.
38. L. F. RADER et W. L. HILL, *Journ. Agric. Research*, **57**, 1938, p. 901.
39. R. S. YOUNG, *Cornell Univers. Agric. Exp. Stat. mem.* **174**, 1935, p. 32.
40. G. BERTRAND, *Ann. Agron.*, nouv. série, **8**, 1938, p. 1.

#### FLUOR

41. A. CARNOT, A. GAUTIER, H. LASNE, LIND et OBRY, cités par D. SIDERSKY, *Aide-mémoire de Chimie appliquée*. Ch. Béranger, édit., Paris, 1934, p. 733.
42. K. D. JACOB et D. S. REYNOLDS, *Journ. Assoc. Off. Agr. Chem.*, **11**, 1928, p. 237.
43. C. BRIOUX et E. JOUIS, *Rapport sur le fonct. Inst. Rech. Agron. en 1932*, p. 172.
44. S. MARCOVITCH et W. W. STANLEY, *Ind. and Eng. Chemistry*, **2**, 1930, p. 121.

ARSENIC (et Cu, Zn, Pb)

45. L. L. SMITH, *Florida Quart. Bul.*, **42**, 1933, p. 27.
46. M<sup>lle</sup> RÉMY, *Rapport sur le fonct. Inst. Rech. Agron. en 1929*, p. 177.

#### IODE

47. T. VON FELLENBERG, *Biochem. Zeitschr.*, **152**, 1924, p. 116.
48. K. SCHARER et J. SCHWAIBOLD, *Biochem. Zeitschr.*, **195**, 1928, p. 283.
49. W. SCHREIBER, *Landw. Vers. Sta.*, **127**, 1936, p. 57.

CHROME (et Cu, Zn)

50. B. DIAZ OSSA, *Rev. Intern. de Renseign. Agric.*, Rome, **16**, 1925, p. 1011.
51. A. GRAMMONT, *Bull. Soc. Chim. de France*, 4<sup>e</sup> série, **35**, 1924, p. 405.
52. R. GUILLIN, *C. R. Acad. Agric.*, **2**, 1916, p. 760.

#### MANGANÈSE

53. Ch. GUFFROY, CREPEAUX et MILON, *Bull. Soc. Nat. Agric. France*, **65**, 1905, p. 479.
54. A. DEMOLON et G. BROUET, *Journ. Agric. prat.*, **138** (27, nouv. série), 1914, p. 22.
55. J. S. MC HARGUE, *Fertilizer green book*, **6**, 1925, p. 17.
56. S. GERICKE, *Bodenk. und Pflanz.*, **19**, 1940, p. 187.
57. M. POPP, *Fühlings Landwirtschaftl. Zeit.*, **65**, 1916 (n<sup>o</sup> 15-16), p. 354.
58. P. E. TURNER, *Proc. Sugar Cane Investigation Committee* (Trinidad), **4**, 1903, p. 206.

CUIVRE

- Voir ci-dessus A. GRAMMONT [51], R. S. YOUNG [39], R. BRECKPOT [37], M<sup>lle</sup> RÉMY [46].
59. P. MARSAIS, *C. R. Acad. Agric.*, **28**, 1942, p. 162.

ZINC

- Voir ci-dessus A. GRAMMONT [51], R. BRECKPOT [37], F. E. HANCE [36].

PLOMB

- Voir ci-dessus R. BRECKPOT [37], F. E. HANCE [36], R. S. YOUNG [39], M<sup>lle</sup> RÉMY [46].

PREMIÈRE PARTIE

« *Oligo-éléments* » et développement des plantes

I. — Travaux antérieurs

BORE

Présence dans les végétaux

60. A. WITTSTEIN et F. APOIGER, *Ann. der Chem. und Pharm.* (Liebig), **103**, 1857, p. 362.
61. E. BECHI, *Acc. dei Lincei*, 15 juin 1879, d'après *Bull. Soc. Chim.*, 3<sup>e</sup> série, **3**, 1890, p. 122.
62. E. O. VON LIPPMANN, *Ber. Deutsch. Chem. Gesells.*, **21**, 1888, p. 3492.
63. C. A. CRAMPTON, *Amer. Chem. Journ.*, **2**, 1889, p. 227.
64. J. S. CALLISON, *Journ. Anal. Chem.*, **4**, 1890, p. 191.
65. E. HOTTER, *Landw. Vers. Stat.*, **37**, 1890, p. 437.
66. N. PASSERINI, *Staz. Sper. Agr. ital.*, **21**, 1891, p. 20 et 561.
67. H. JAY, *C. R. Acad. Sc.*, **121**, 1895, p. 896; *Bull. Soc. Chim.*, 3<sup>e</sup> série, **15**, 1896, p. 33.
68. H. AGULHON, *Thèse Faculté Sciences*, Paris, 1910, p. 56 (Barnéoud, impr. Laval); a) p. 49; b) p. 23; c) p. 97.
69. F. C. COOK, *Journ. Agr. Research*, **5**, 1916, p. 877.
70. S. TAKAJI, *Journ. Pharm. Soc. Japan.*, 1916, p. 27; *Chem. Centralbl.*, 1916, I, p. 3553.
71. A. S. DODD, *Analyst.*, **54**, 1929, p. 15.
72. G. BERTRAND et H. L. DE WAAL, *C. R. Acad. Sc.*, **202**, 1936, p. 605; *Ann. Agron.*, nouv. série, **6**, 1936, p. 537.
73. G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN, *C. R. Acad. Sc.*, **204**, 1937, p. 1019; **206**, 1938, p. 796; **211**, 1940, p. 624; **213**, 1941, p. 221; *Ann. Agron.*, nouv. série, **7**, 1937, p. 505; **8**, 1938, p. 443; **10**, 1940, p. 1 et 211.

Action sur les végétaux inférieurs

74. J. B. DUMAS, *C. R. Acad. Sc.*, **75**, 1872, p. 277.
75. A. RABUTEAU et F. PAPILLON, *C. R. Acad. Sc.*, **75**, 1872, p. 755.
76. A. PETIT, *C. R. Acad. Sc.*, **75**, 1872, p. 881.
77. J. BOSEKEN et H. I. WATERMANN, *Folia Microb.* (Delft), **1**, 1912, p. 17; résumé dans *Mycol. Centralbl.*, **1**, 1912, p. 322.
78. A. CUSAMANO, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **58**, 1925, p. 440.

Action sur la germination

79. E. HECKEL, *C. R. Acad. Sc.*, **80**, 1875, p. 1170.
80. J. MOREL, *C. R. Acad. Sc.*, **114**, 1892, p. 131.
81. J. A. VÆLCKER, *Journ. Roy. Agr. Soc. England*, **76**, 1915, p. 347.

Action sur le développement des plantes supérieures

82. E. PÉLIGOT, *C. R. Acad. Sc.*, **83**, 1876, p. 686.
83. M. NAKAMURA, *Bull. Col. Agr. Tokyo Imp. Univ.*, **5**, 1903, p. 509.
84. G. RIVIÈRE et G. BAILHACHE, *Journ. Soc. Nat. d'Horticulture de France*, **14**, 1913, p. 782; expériences rappelées par G. BERTRAND : *C. R. Acad. Agric.*, **21**, 1935, p. 983.

85. H. AGULHON, *C. R. Acad. Sc.*, **150**, 1910, p. 288; *Ibid.*, **151**, 1910, p. 1382; *Ann. Inst. Pasteur*, **24**, 1910, p. 321.
86. E. HASELHOFF, *Landw. Vers. Stat.*, **79-80**, 1913, p. 399.
87. W. E. BRENCHELEY, *Inorganic plant poisons and stimulants*, Cambridge, University Press., 1914; *Ann. Botany*, **28**, 1914, p. 283, résumé dans *Journ. of the Chem. Soc.*, 1914, abs., 106, 1, 790.
88. W. E. BRENCHELEY, *Agr. Prog.*, Agr. ed. Assoc. London, **3**, 1926, p. 104.
89. W. E. BRENCHELEY et K. WARINGTON, *Ann. Botany*, **41**, 1927, p. 167.
90. F. C. COOK, *Journ. of Agric. Research*, **5**, 1916, p. 877.
91. F. C. COOK et J. B. WILSON, *Journ. of Agric. Research*, **10**, 1917, p. 590; a) **13**, 1918, p. 452.
92. S. D. CONNER, *Proc. Ind. Acad. Sc.*, 1917, p. 195.
93. S. D. CONNER et E. N. FERGUS, *Indiana Stat. Bul.*, **239**, 1920, p. 3.
94. A. BRUNO, *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 6<sup>e</sup> série, 1920, p. 185.
95. O. SCHREINER, B. E. BROWN, J. J. SKINNER et M. SHAPOVALOV, *U. S. Dept. Agr. circ.*, **84**, 1920, 35 p.
96. A. W. BLAIR, *New Jersey Agr.*, **2**, 1920, p. 12.
97. A. W. BLAIR et B. E. BROWN, *Soil Science*, **11**, 1921, p. 369.
98. B. E. BROWN, *U. S. Dept. Agr. Bul.*, **998**, 1922, 8 p.
99. W. J. MORSE, *Maine Sta. Bul.*, **288**, 1920, p. 89.
100. J. R. NELLER et W. J. MORSE, *Soil Science*, **12**, 1921, p. 79.
101. J. R. NELLER, *New Hampshire Sta. Bul.*, **203**, 1922.
102. J. E. BRECKENRIDGE, *Journ. Indust. and Engin. Chem.*, **13**, 1921, p. 324.
103. J. J. SKINNER, B. E. BROWN et F. R. REID, *U. S. Dept. Agr. Bull.*, **1.126**, 1923, 31 p.
104. J. J. SKINNER et F. E. ALLISON, *Journ. Agr. Research.*, **23**, 1923, p. 433.
105. P. MAZÉ, *C. R. Acad. Sc.*, **168**, 1915, p. 211; *Ann. Inst. Pasteur*, **33**, 1919, p. 139.
106. J. VAN OVERBEEK, *Meded. Phytopath. Lab. « Willic Connetin Scholten Baarn »*, Holland, **13**, 1934, p. 29.
107. K. WARINGTON, *Ann. Botany (London)*, **37**, 1923, p. 629.
108. K. WARINGTON, *Ibid.*, **40**, 1926, p. 27.
109. A. B. FAGUNDES, *New Jersey Sta. Rpt.*, 1926, p. 357.
110. J. DUFRÉNOY, *C. R. XVII<sup>e</sup> Congrès Chim. indust.*, Paris, sept.-oct. 1937, p. 746.
111. W. E. BRENCHELEY et H. G. THORNTON, *Roy. Soc. (London), Proc. série B*, **98**, 1925, n° B, 691, p. 373.
112. A. L. SOMMER et H. SOROKIN, *Plant Physiol.*, **3**, 1928, p. 237.
113. M. P. LÖHNIS, *Meded. Landb. Hoogesch. Wageningen.*, **41**, 3, 1937, p. 1.
114. A. NOWOTNOWNA, *Mem. Inst. Nat. Polonais d'Econom. rur. Pulawy*, **16**, 1935, p. 49; a) *Ibid.*, **15**, 1934, p. 19.
115. G. H. COLLINGS, *Soil Science*, **23**, 1927, p. 83.
116. S. V. EATON, *Plant Physiol.*, **15**, 1940, p. 95.
117. H. BURGEVIN, *Rech. sur la fertilit. effectuées en 1936 par les Stat. Agron.*, 10<sup>e</sup> rapp. annuel, p. 136.
118. K. SCHARRER et W. SCHROPP, *Bodenk. u. Pflanzenern.*, **1**, 1936, p. 370.
119. H. R. Mc LARTY, J. C. WILCOX et C. G. WOODBRIDGE, *Rev. Agron. canadienne*, **17**, 1937, p. 515.
120. A. L. SOMMER et C. B. LIPMAN, *Plant Physiol.*, **1**, 1926, p. 231.
121. J. S. Mc HARGUE et O. M. SHEDD, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **22**, 1930, p. 739.
122. H. S. MORRIS, *Torrey Bot. Club Bul.*, **58**, 1931, p. 1.
123. H. BURGEVIN, *Rech. sur la fertilit. effectuées en 1936 par les Stat. Agron.*, p. 137.
124. G. JORET et H. MALTERRE, *Ibid.*, p. 137.
125. J. GAROLA, *Ibid.*, 1937, p. 189.
126. V. VINCENT, *Ibid.*, 1937, p. 192.
127. M. P. LÖHNIS, *Chem. Weekblad.*, **33**, 1936, p. 59, résumé dans *Analyst*, **61**, 1936, p. 202.
128. W. SCHROPP et B. ARENZ, *Bodenk. u. Pflanzenern.*, **16**, 1940, p. 169; **19**, 1940, p. 160.
129. M. TOKUOKA et M. HITOSHI, *J. Soc. Trop. Agr. Taihoku. Imp. Univ.*, **9**, 1937, p. 12.
130. M. V. KATALYMOV, *Miner. Udobreniya i Insektofungisidui*, **1**, 1935, p. 67.
131. A. D. KOSTYUCHENKO, *Chemis. Soc. Agr. (U. R. S. S.)*, **2**, 1938, p. 82.
132. E. TRUNINGER, *Herbage Abstracts*, **8**, 1938, p. 376.
133. E. V. BOBKO et V. V. ZERLING, *Ann. Agron., nouv. série*, **8**, 1938, p. 183.
134. Ch. BRIOUX et E. JOUIS, *Rech. sur la fertilit. effectuées en 1938 par les Stat. Agron.*, p. 224.
135. M. Y. SHKOLNIK, *C. R. Acad. Sc (U. R. S. S.)*, **2**, 1935, p. 167.
136. F. M. EATON, *Soil Science*, **34**, 1932, p. 301.
137. K. T. HOLLEY et T. G. DULIN, *Georgia Sta. Bul.*, **197**, 1937, p. 14.
138. M. TOKUOKA et D. SUISEN, *J. Soc. Trop. Agr. Taihoku Imp. Univ.*, **9**, 1937, p. 330.

139. J. P. MARTIN, *Hawai Planters Rec.*, **38**, 1934, p. 95.
  140. W. P. KELLEY et S. M. BROWN, *Hilgardia*, **3**, 1928, p. 445.
  141. C. S. SCOFIELD et L. V. WILCOX, *U. S. Dept. Agr. Tech. Bul.*, **264**, 1931, p. 66.
  142. A. R. C. HAAS, *California Citrogr.*, **14**, 1929, p. 355 ; *Bot. Gaz.*, **88**, 1929, p. 113 ; *Ibid.*, **89**, 1930, p. 410.
  143. A. R. C. HAAS et L. J. KLOTZ, *Hilgardia*, **5**, 1931, p. 1.
  144. W. MAIER, *Gartenbauwissenschaft*, **11**, 1937, p. 1.
  145. C. F. RUDLOFF, W. HERBST et E. SCHNEIDERS, *Landw. Jahrb.*, **84**, 1937, p. 843.
  146. D. A. VAN SCHREVEN, *Landbouwk. Tijdschr.*, **47**, 1935, p. 706.
  147. G. JORET et H. MALTERRE, *Ann. Agron.*, nouv. série, **6**, 1936, p. 306.
  148. V. VINCENT, *Bull. Assoc. franç. pour l'étude du sol*, **2**, 1936, p. 302.
  149. J. S. Mc HARGUE et R. K. CALFEE, *Plant Physiol.*, **7**, 1932, p. 161 et **8**, 1933, p. 305.
  150. R. J. MUCKENHIRN, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **28**, 1936, p. 824.
  151. E. R. PURVIS et R. W. RUPRECHT, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1935, p. 63 et 1936, p. 61.
  152. E. S. JOHNSTON et W. H. DORE, *Science*, **67**, 1928, p. 324 ; *Plant Physiol.*, **4**, 1929, p. 31.
  153. E. J. JOHNSTON et P. L. FISHER, *Plant Physiol.*, **5**, 1930, p. 385.
  154. D. A. VAN SCHREVEN, *Tijdschr. Plantenziekten*, **41**, 1935, p. 1.
  155. W. E. LOOMIS et J. J. WILSON, *Proc. Iowa Acad. Sc.*, **40**, 1933, p. 53.
  156. R. B. FRENCH, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1936, p. 62.
  157. T. R. SWANBACK, *Plant Physiol.*, **2**, 1927, p. 475.
  158. J. E. Mc MURTREY jr., *Journ. Agr. Research*, **38**, 1929, p. 371.
  159. J. KUIJPER, *Deli Proejsta. Medan. Sumatra*, Flugschr., **50**, 1930, p. 7.
  160. J. E. Mc MURTREY jr., *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **27**, 1935, p. 271.
  161. A. I. SMIRNOV, *U. R. S. S. Inst. Tobacco Invest. Bull.*, **70**, 29, 1930.
  162. M. MES, *Phytopath. Zeits.*, **2**, 1930, p. 593.
  163. D. R. VAN SCHREVEN, *Tijdschr. Plantenziekten*, **40**, 1934, p. 98.
  164. M. F. MORGAN et O. E. STREET, *Connecticut Agr. Expt. Sta. Bul.*, **410**, 1938, p. 393.
  165. F. TERLIKOWSKI et K. MILKOWSKI, *Polish Agr. Forest*, Ann. **31**, 1934, p. 167.
- Bore et « maladie du cœur de la betterave »*
166. E. BRANDENBURG, *Phytopath. Zeits.*, **3**, 1931, p. 499.
  167. E. BRANDENBURG, *Angewandte Botanik*, **14**, 1932, p. 194.
  168. PLUCHET, *Bull. des séances de la Soc. Roy. et Cent. d'Agric.*, 1864, p. 348.
  169. E. PRILLIEUX et G. DELACROIX, *Bull. Soc. Mycol. de France*, **7**, 1891, p. 23.
  170. A. B. FRANK, *Zeits. f. Rubenzucker Ind.*, **42**, 1892, p. 913.
  171. G. BERTRAND, *Ann. Agron.*, nouv. série, **9**, 1939, p. 548 ; *Ann. des Ferment.*, **5**, 1939, p. 349.
  172. E. V. BOBKO et M. A. BELVOUSSOV, *Ann. Agron.*, nouv. série, **3**, 1933, p. 493.
  173. K. MEYER-HERMANN, *Deut. Landw. Presse*, **60**, 1933, p. 194 ; **62**, 1935, p. 133 et 609 ; *Pflanzenbau*, **11**, 1934, p. 24 ; *Deut. Zuckerind.*, **60**, 1935, p. 1018 ; *Kranke Pflanze*, **12**, 1935, p. 513 ; *Zuckerrubensbau*, **18**, 1936, p. 51.
  174. O. KAUFMANN, *Deut. Zuckerind.*, **59**, 1934, p. 305.
  175. K. DE HAAN, *Mededeel. Inst. Suikerbietenenteelt*, **4**, 1934, p. 92 ; *IV<sup>e</sup> Congrès intern. tech. chim. ind. agr.*, Bruxelles, **2**, 1935, p. 437 ; *Nieuwe Veldbode*, **5**, 1935.
  176. E. FOEX et H. BURGEVIN, *C. R. Acad. Agric.*, **20**, 1934, p. 978 ; **21**, 1935, p. 979 ; **23**, 1937, p. 195.
  177. A. NOWOTNOWNA, *Gaz. Cukrownicza*, **74**, 1934, p. 104.
  178. N. I. SOLUNSKAYA, *Nauch. Zapiski Dakharnoi Prom.*, **11**, 46-8, 1934, p. 77.
  179. R. FISCHER, *Wiener Landwirt. Zeit.*, **14**, avril 1934.
  180. R. SCHMID, *Ibid.*, **14**, avril 1934 ; *Deut. Landw. Gesell.*, **49**, 1934, p. 366.
  181. C. BRIOUX et E. JOUIS, *C. R. Acad. Agric.*, **21**, 1935, p. 1039.
  182. E. KRAUSS, *Deut. Landw. Presse*, **62**, 1935, p. 297.
  183. K. SCHUMANN, *Ibid.*, **62**, 1935, p. 171.
  184. K. SCHARRE, *Zuckerrubensbau*, **17**, 1935, p. 115.
  185. E. VARGA, *Cukoreepa*, 15 août 1935.
  186. J. E. KOTILA et G. H. COONS, *Facts About Sugar*, **30**, 1935, p. 373.
  187. J. GAROLA, *Rech. sur la fertilis. effectuées en 1936 par les Stat. Agron.*, 10<sup>e</sup> rapp. annuel, p. 142.
  188. E. A. JAMALAINEN, *Maatalonstiet.*, **29**, 3, 1936, p. 1.
  189. L. DECOUX, J. VANDERWAEREN et G. ROLAND, *Publ. Inst. Belge pour l'amélior. de la betterave*, **4**, 1936, p. 67 et **5**, 1937, p. 188.
  190. E. NEUWEILER, *Ann. Agron. de la Suisse*, **37**, 1936, p. 273 et 1940, p. 916.
  191. F. HANLEY et J. C. MANN, *J. Ministry Agr. (England)*, **43**, 1936, p. 15.
  192. D. A. VAN SCHREVEN, *Mededeel. Inst. Suikerbietenenteelt*, **6**, 1936, p. 153.
  193. E. W. SCHMIDT, *Z. Wirtschaftsgruppe Zuckerind.*, **87**, Tech. Tl., 1937, p. 679.

194. H. OSVALD et P. GUNNAR, *Lantbruks-Hogskol.*, **4**, 1937, p. 233.
195. H. HIRSCH, *Tijdschr. Plantenziekten*, **43**, 1937, p. 115.
196. W. E. BRENCHEY et D. J. WATSON, *Ann. Applied. Biol.*, **24**, 1937, p. 494.
197. W. SCHROPP et K. SCHARRER, *Bodenk. u. Pflanzenern.*, **50**, 1937, p. 289.
198. H. D. BROWN, *Proc. Am. Soc. Sugar Beet Tech.*, 1938, p. 28.
199. J. PAZLER, *Landw. Fachpr. Tschech.*, **16**, 25 mars 1938.
200. O. FALLADA, *Listy Cukrovar.*, **56**, 1938, p. 303.
201. G. BARATHON-MAZEN, *La vie agr. et rur.*, 1938, p. 158.
202. R. L. COOK, *Better Crops with Plant Food*, **24**, 1940, p. 12 et 39.
203. H. BURGEVIN, *Rech. sur la fertilis. effectuées par les Stat. Agron. en 1938*, p. 222 et en 1939, p. 155.
204. E. R. PURVIS et W. J. HANNA, *Soil Sc. of America Proceedings*, III, 1938, p. 205.

*Bore et « maladie du cœur brun des navets et des rutabagas »*

205. D. G. O'BRIEN et R. W. DENNIS, *Scott. Journ. Agr.*, **18**, 1935, p. 226 et **19**, 1936, p. 40.
206. H. HILL et E. P. GRANT, *Scientific Agric.*, **15**, 1935, p. 652.
207. R. R. HURST et D. J. MAC LEOD, *Ibid.*, **17**, 1936, p. 209.
208. T. RIGG, H. O. ASKEW et E. CHITTENDEN, *New Zealand J. Sc. Tech.*, **18**, 1937, p. 750.
209. M. B. DAVIS et W. FERGUSON, *Better Crops with Plant Food*, **21**, 1937, p. 6 et 41.
210. D. S. MAC LEOD et J. L. HOWATT, *Am. Potato J.*, **11**, 1934, p. 60.
211. E. A. JAMALAINEN, *Maatalons-Sheteellinen Arkakanskirja*, **7**, 1935, p. 182.
212. T. WHITEHEAD, *Welsh. J. Agr.*, **11**, 1935, p. 235.
213. F. B. CHANDLER, J. A. CHUCKA et I. C. MASON, *Maine Agr. Exp. Stat. Bul.*, **380**, 1935, p. 229.
214. B. G. SNYDER et R. W. DONALDSON, *Amer. Soc. Hort. Sc. Proc.*, **33**, 1936, p. 480.
215. J. W. WOODCOCK, *New Zealand J. Agr.*, **53**, 1936, p. 99 ; **55**, 1937, p. 151.
216. E. CHITTENDEN et L. COPP, *Ibid. Tech.*, **19**, 1937, p. 372.

*Bore et « brunissement du chou-fleur »*

217. C. H. DEARBORN, H. C. THOMPSON et G. J. RALEIGH, *Amer. Soc. Hort. Sc. Proc.*, **33**, 1936, p. 483.
218. F. B. CHANDLER, J. A. CHUCKA et I. C. MASON, *Maine Agr. Exp. Sta. Bul.*, **387**, 1937, p. 202.
219. W. FERGUSON, *Scientific Agric.*, **18**, 1938, p. 388.

*Bore et « maladie du liège des pommes »*

220. J. D. ATKINSON, *New Zealand Journ. Sc. and Techn.*, **16**, 1935, p. 316 ; **18**, 1936 p. 381 ; **19**, 1937, p. 459 et 461.
221. H. O. ASKEW et E. CHITTENDEN, *Ibid.*, **18**, 1936, p. 365 et *J. Pomology Hort. Sc.*, **14**, 1936, p. 227.
222. J. S. BAILEY et W. H. THIES, *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **34**, 1937, p. 187.
223. H. HILL et M. B. DAVIS, *Scientific Agric.*, **17**, 1936, p. 199.
224. H. R. MC LARTY, J. C. WILCOX et C. G. WOODBRIDGE, *Proc. 32<sup>nd</sup> Ann. Meeting Wash. State Hort. Assoc.*, 1936, p. 142.
225. W. M. CARNE et D. MARTIN, *J. Council Sc. Ind. Research*, **10**, 1937, p. 47.
226. C. G. SAVAGE et H. BROADFOOT, *Agr. Gaz. N. S. Wales*, **48**, 1937, p. 387 et 447.
227. L. C. YOUNG et C. F. BAILEY, *Scientific Agric.*, **17**, 1937, p. 115.
228. A. B. BURRELL, *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **35**, 1938, p. 169.
229. J. R. MAGNESS, *Proc. 42<sup>nd</sup> Ann. Meeting Virginia State Hort. Soc.*, in *Virginia Fruit*, **26**, 1938, p. 139.
230. C. BRIOUX et E. JOUIS, *Rech. sur la fertilis. effectuées en 1937 par les Stat. Agron.*, 11<sup>e</sup> rapp. annuel, p. 190.
231. H. HILL, *Pomological et Fruit Growing Soc. Québec 42<sup>nd</sup> Ann. Rept.*, 1935, p. 65.
232. H. O. ASKEW, *New Zealand J. Sc. and Techn.*, **17**, 1935, p. 388.
233. T. RIGG, *Commun. 11<sup>th</sup> Congr. Int. Hort. Rome*, **8**, 1935.
234. C. G. WOODBRIDGE, *Scientific Agric.*, **18**, 1937, p. 41.
235. E. S. DEGMA, L. P. BATJER, L. O. REGEIMBAL et J. R. MAGNESS, *Proc. Am. Soc. Hort. Sc.*, **35**, 1938, p. 165.

*Bore et « Hard Fruit » des orangers*

236. A. A. MORRIS : *J. Pomology Hort. Sc.*, **16**, 1938, p. 167.

Rôle du bore dans les végétaux

237. E. V. BOBKO, T. V. MATVEEVA et G. S. SYVOROTKIN, *Ann. Agron.*, nouv. série, 5, 1935, p. 801.
238. Th. SCHMUCKER, *Planta*, 23, 1-2, 1934, p. 264.

FLUOR

239. S. SUZUKI et K. Aso, *Bull. Col. Agr. Tokyo Imp. Univ.*, 5, 1903, p. 473.
240. K. Aso, *Ibid.*, 7, 1906, p. 83; a) *Ibid.*, 7, 1906, p. 85.
241. S. UCHIYAMA, *Bull. Imp. Cent. Agr. Expt. Stat. Japan*, 1, 1907, p. 37.
242. S. KAKEHI et K. BABA, *Bull. Col. Agr. Tokyo Imp. Univ.*, 7, 1907, p. 455.
243. A. GAUTIER et P. CLAUSMANN, *C. R. Acad. Sc.*, 162, 1916, p. 105; a) *Ibid.*, 168, 1919, p. 976; b) *Ibid.*, 169, 1919, p. 115.
244. A. WÖBER, *Angew. Botanik*, 2, 1920, p. 161.
245. J. A. VOELCKER, *Journ. Roy. Agr. Soc. England*, 82, 1921, p. 286.
246. O. LOEW, *Agr. Notes, Porto-Rico*, octobre 1925.
247. A. H. MEYER, *Journ. Amer. Soc. Agronomy*, 28, 1931, p. 605.
248. C. P. SIDERIS et B. H. KRAUSS, *II<sup>e</sup> Congrès Pathol. comparée*, 2, 1931, p. 416.
249. K. SCHARER et W. SCHROPP, *Landw. Versuchs Stat.*, 114, 1932, p. 203.
250. L. B. WILSON, *Journ. of Agric. Res.*, 46, 1933, p. 889.
251. J. GRINTZESCO et S. PETERFI, *Bull. Soc. Chim. Romania*, 18 A, 1936, p. 177.
252. D. I. ARNON, *Am. Journ. Botany*, 25, 1938, p. 322.
253. C. BRIOUX et E. JOUIS, *C. R. Acad. Agric.*, 20, 1934, p. 257.
254. P. H. PHILIPPS, E. B. HART et G. BOHSTEDT, *Wis. Agr. Expt. Stat. Bull.*, 1933, p. 430 et 1935, p. 125.
255. H. H. MORSE, *Soil Science*, 39, 1935, p. 177.
256. R. P. BARTHOLOMEW, *Ibid.*, 40, 1935, p. 203.
257. S. MARCOVITCH, *Tenn. Agr. Exp. St. Bull.*, 139, 1, 48, 1928; *Chem. Abstr.*, vol. 22, n° 17, 10 septembre 1928.
258. S. M. MASHTAKOV et K. I. STRACHITSKII, *Trans. Sc. Inst. Fertilizers and Insecto-fungicides U. R. S. S.*, 123, 1935, p. 184.

ARSENIC

259. F. NOBBE, P. BAESSLER et H. WILL, *Landw. Vers. Sta.*, 30, 1884, p. 380.
260. KNOP, *Bericht. d. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch.*, 1885, p. 49.
261. LÖW, *System. d. Giftwirkung*, 1893, p. 19.
262. MOLISCH, *Sitzungsb. d. Wien Acad.*, vol. 105, I, p. 10.
263. E. HECKEL, *C. R. Acad. Sc.*, 80, 1875, p. 1172.
264. A. S. KITCHCOCK et M. A. CARLETON, *Kansas Sta. Bul.*, 41, 1893, p. 63.
265. B. JONSSON, *Kgl. Landt. Akad. Handl.*, 35, 1896, p. 95.
266. J. FAUGERAS et SCHIFF, *Rev. de Viticulture*, 68, n° 1755, 16 février 1928.
267. J. VALLEGA et R. FRESA, *Bol. mens. d. Minist. d. Agric. (Républ. Argent.)*, 33, 1933, p. 451.
268. R. Y. BAILEY et J. M. ROBINSON, *Ala. Agr. Expt. Sta.*, 45, Ann. Rept. 1934, p. 13.
269. REED, J. FIELDING et M. B. STURGIS, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, 28, 1936, p. 432.
270. C. DORMAN et R. COLEMAN, *Ibid.*, 31, 1939, p. 966.
271. S. C. VANDECAVEYE, G. M. HORNER et C. M. KEATON, *Soil Science*, 42, 1936, p. 203.
272. M. RAUCOURT, *Ann. des Epiphyt. et de Phylogén.*, 4, 1938, p. 589.
273. G. RIVIÈRE et G. PICHARD, *C. R. Acad. Sc.*, 174, 1922, p. 493; *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 1922, p. 370.
274. C. PICADO, *C. R. Soc. Biol.*, 87, 1922, p. 1338.
275. E. LYTTKENS, *Tidskr. Landtman*, 15, 1894, p. 172.
276. A. STUTZER, *Deut. Landw. Presse*, 28, 1901, p. 61.
277. H. ROSENBAUM, *Bodenk. und Pflanz.*, 19, 1940, p. 248.
278. J. STOKLASA, *Ann. Agron.*, 1<sup>re</sup> série, 23, 1897, p. 471.
279. R. BOUILHAC, *Bull. Soc. Botanique de France*, 46, 1899, p. 64.
280. F. JADIN et A. ASTRUC, *Rev. Scient.*, 54, 1916, p. 589; a) *C. R. Acad. Sc.*, 154, 1912, p. 893; 155, 1912, p. 291; 156, 1913, p. 2023; 159, 1914, p. 268; *Journ. Pharm. et Chim.*, 7<sup>e</sup> série, 6, 1912, p. 529.
281. R. COBET, *Biochem. Zeitschr.*, 98, 1919, p. 294.
282. J. STEWART et E. S. SMITH, *Soil Science*, 14, 1922, p. 111.
283. E. HASELHOFF, F. HAUN et W. ELBERT, *Landw. Vers. Stat.*, 110, 1930, p. 287.
284. L. SCHMITT, *Forts. d. Landw.*, 5, 1930, p. 633.
285. W. B. ALBERT et C. H. ARNDT, *S. Carol. Agr. Expt. Sta. Rpt.*, 1931, p. 47.

286. A. H. MEYER, *Assoc. Southern Agr. Workers. Proc.*, **34**, **35**, **36**, Ann. Conventions 1933-35, p. 241.  
 287. A. M. HURD-KARRER, *J. Wash. Acad. Sc.*, **26**, 1936, p. 180.  
 288. R. MUNGOMERY, *Cane Growers Quart. Bull.* (Queensland), **5**, 1938, p. 151.  
 289. P. BOISCHOT et J. HERVIAUX, *Rech. sur la fertilis. effectuées en 1940 par les Stat. Agron.*, 14<sup>e</sup> rapp. annuel, p. 96; a) *Ibid.*, 1941, 15<sup>e</sup> rapp. annuel, p. 154.

#### IODE

##### *Présence dans l'air, l'eau, les sols, les plantes*

290. A. CHATIN, *C. R. Acad. Sc.*, **30**, 1850, p. 352; **32**, 1851, p. 669; **33**, 1851, p. 529 et 584; **34**, 1852, p. 14, 51, 409; **35**, 1852, p. 127; **36**, 1853, p. 652; **37**, 1853, p. 723, 934; **38**, 1854, p. 83; **39**, 1854, p. 1083; **46**, 1858, p. 400; **50**, 1860, p. 420; **82**, 1876, p. 128.  
 291. A. GAUTIER, *C. R. Acad. Sc.*, **128**, 1899, p. 643; **132**, 1901, p. 935.  
 292. P. BOURCET, *Ibid.*, **128**, 1899, p. 1120.  
 293. E. WINTERSTEIN, *Hoppe-Seylers Zeitschr. Physiol. Chem.*, **104**, 1918, p. 54.  
 294. I. VON FELLEBERG, *Biochem. Zeitschr.*, **139**, 1923, p. 371; **142**, 1923, p. 246; **152**, 1924, p. 116.

##### *Action sur le développement des plantes*

295. J. A. VOELCKER, *Journ. Roy. Agr. Soc. England*, **11**, 1900, p. 553.  
 296. J. STOKLASA, *C. R. Acad. Sc.*, **178**, 1924, p. 120.  
 297. E. UNGERER, *Zeitschr. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.*, **4**, 1925, p. 369.  
 298. O. LOEW, *Ibid.*, **A. 7**, 1926, p. 233.  
 299. M. COTTON, *Torrey Bot. Club. Bul.*, **57**, 1930-31, p. 127.  
 300. G. V. WENDT, *Gartenflora*, **79**, 1930, p. 213; cité par *Biol. Abstr.*, **7**, 1933, p. 791.  
 301. G. R. STEWART, *Hawaiian Sugar Planters Assoc. Proc.*, **49**, 1930, p. 328; cité dans *Chem. Abstr.*, **24**, 1930, p. 5404.  
 302. K. SCHARER et W. SCHROPP, *Biochem. Zeitschr.*, **236**, 1931, p. 187.  
 303. F. STRÖBELE, *Ergebn. der Agrik. Chem.*, **1**, 1931, p. 53.  
 304. A. B. BEAUMONT et E. B. HOLLAND, *Mass. Agr. Expt. Sta. Bul.*, **315**, Ann. Rept., 1934, p. 14.  
 305. F. L. WYND, *Ann. Missouri Bot. Gard.*, **21**, 1934, p. 367.  
 306. J. S. Mc HARGUE, *Kentucky Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1936, p. 23.  
 307. MACK, B. WARREN et E. P. BRASIER, *Journ. Agr. Research*, **53**, 1936, p. 789.  
 308. R. VON VEGESACK, *Deutsche Landwirtschaftl. Presse*, 1937, n° 44, p. 541.  
 309. H. EDDÉLBUHEL, *Zeitschr. f. Angew. Chem.*, 1928, p. 309.  
 310. E. G. DÖRELL, *Zeitschr. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.*, **A 12**, 1928, p. 344.  
 311. F. WEISKE, *Wiss. Arch. Landw. A, Pflanzenbau*, **4**, 1930, p. 366.  
 312. F. GIESECKE et K. SCHMALFUSS, *Bodenk. u. Pflanz.*, 1938, 9-10, p. 580.  
 313. C. BRIOUX, *Rapport sur le fonct. de l'Inst. des Rech. Agron.*, 1932, p. 96.  
 314. J. GAROLA, *Ibid.*, 1933, p. 49; 1934, p. 48; a) *Rech. sur la fertilis. effectuées en 1935 par les Stat. Agron.*, p. 10.  
 315. E. DUPONT, *Rapport sur le fonct. de l'Inst. des Rech. Agron.*, 1933, p. 49.  
 316. V. VINCENT, *Ibid.*, 1933, p. 49.  
 317. M. A. VON WRANGELL, *Chem. Zeitung*, **54**, 1930, p. 735.

#### CHROME

318. A. HÉBERT, *Bull. Soc. Chim. de France*, 4<sup>e</sup> série, **1**, 1907, p. 1026.  
 319. P. KÖNIG, *Chem. Zeitung*, **35**, 1911, p. 442 et 462.  
 320. J. WOLFF, *C. R. Acad. Sc.*, **157**, 1913, p. 1022.  
 321. PFEIFFER, SIMMERMACHER et RIPPEL, *Fühlings Landw. Zeit.*, **67**, 1918, p. 113.  
 322. J. D. NEWTON et A. D. PAUL, *Canad. J. Research*, **13**, C, 1935, p. 101.  
 323. E. HASELHOFF, F. HAUN et W. ELBERT, *Landw. Vers. Stat.*, **110**, 1930, p. 283.  
 324. K. SCHARER et W. SCHROPP, *Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.*, **37**, 1935, p. 137.  
 325. O. FALLADA, *Listy Cukrovar.*, **56**, 1938, p. 303.

#### MANGANÈSE

##### *Présence dans les plantes*

326. C. SCHEELÉ, *Kg. Sv. Vet. Akad. Handlingar*, **35**, S, 1774, p. 190.  
 327. Th. DE SAUSSURE, *Recherches chimiques sur la végétation*. Vve Nyon, édit., Paris, 1804, p. 303; a) p. 249.  
 328. SALMS-HORSTMAR, *Journ. f. prakt. Chem.*, **46**, L, 1849, p. 202.

329. J. LIEBIG, 35<sup>e</sup> *Lettre sur la Chimie*, 1852.  
 330. MAUMENÉ, C. R. Acad. Sc., **98**, 1884, p. 1056 et 1416.  
 331. D'après L. GRANDEAU, *Traité d'analyse des matières agricoles*, 3<sup>e</sup> édit., Berger-Levrault, Librairie agricole, édit., Paris, 1897, p. 285.  
 332. P. PICHARD, C. R. Acad. Sc., **126**, 1898, p. 1882.  
 333. A. LECLERC, *Ibid.*, **75**, 1872, p. 1209.

*Action sur le développement des plantes*

334. G. BERTRAND et M. JAVILLIER, C. R. Acad. Sc., **152**, 1911, p. 225 et Ann. Inst. Pasteur, **26**, 1912, p. 241.  
 335. G. BERTRAND, C. R. Acad. Sc., **124**, 1897, p. 1032 et 1355.  
 336. G. BERTRAND, C. R. VI<sup>e</sup> Congresso internazion. di Chimica applicata, Rome, 1906, p. 425.  
 337. G. BERTRAND, C. R. Acad. Sc., **141**, 1905, p. 1255; erratum, **142**, 1905, p. 68.  
 338. J. M. SAULNIER, cité par I. GIGLIOLI, *Cultura del frumento*, Portici, 1901, p. 103.  
 339. H. ROUSSET, Ann. de la Sc. Agron. franç. et étrang. (3), **4**, 1909, p. 81.  
 340. H. BARTMANN, Journ. Agric. pratique, nouv. série, **19**, 1910, p. 115.  
 341. A. OLARU, Rôle du manganèse en agriculture. Baillière, édit., Paris, 1920; a) p. 88; b) p. 73.  
 342. O. LËW et S. SAWA, Bull. Coll. Agr. Tokyo Imp. Univ., **5**, 1902-03, p. 161.  
 343. O. LËW et S. HONDA, *Ibid.*, **6**, 1904, p. 125.  
 344. M. NAGAOKA, *Ibid.*, **5**, 1903, p. 467; **6**, 1904, p. 135.  
 345. K. ASO, *Ibid.*, **6**, 1904, p. 131; **7**, 1907, p. 449.  
 346. Y. FUKUTOME, *Ibid.*, **6**, 1904, p. 137.  
 347. T. KATAYAMA, *Ibid.*, **7**, 1906, p. 91.  
 348. T. TAKEUCHI, Journ. Col. Agr. Imp. Univ. Tokyo, **1**, 1909, p. 207.  
 349. J. A. VOELCKER, Journ. Roy. Agr. Soc. England, **64**, 1904, p. 348.  
 350. A. GRÉGOIRE, I. HENDRICK et E. CARPIAUX, Bull. Agr. (Bruxelles), **23**, 1907, p. 388.  
 351. M. DE MOLINARI et O. LIGOT, *Ibid.*, **23**, 1907, p. 764.  
 352. G. SALOMONE, Staz. Sper. Agr. Ital., **40**, 1907, p. 97.  
 353. C. V. GAROLA, Rapport sur les champs d'expér. d'Eure-et-Loir, 1907, cité par BARTMANN (voir 340).  
 354. VAN STEYN et BURGERS, cités par BARTMANN (voir 340).  
 355. W. F. SUTHERST et H. INGLE, Transvaal Agr. Journ., **6**, 1908, p. 437.  
 356. Z. BONOMI, Ann. R. Staz. Sper. Agr. Udine, **9**, 1908, p. 52.  
 357. NAMBA, Jahresber. f. Agr., 1908, p. 253.  
 358. P. LEIDREITER, Inaug. Diss. Rostock, 1910, p. 70; résumé dans Ernähr. Pflanz., **7**, 1911, p. 53; Rev. Scientif., **49**, 1911, p. 536; Centr. Agr. Chem., **40**, 1911, p. 531.  
 359. H. BARTMANN, Journ. Agr. prat., nouv. série, **20**, 1910, p. 666.  
 360. J. STOKLASA, Bl. Zuckerrubensbau, **18**, 1911, p. 193; résumé dans Chem. Zeit., **35**, 1911, n° 86. Repert., p. 361.  
 361. G. MASONI, Staz. Sper. Agr. Ital., **44**, 1911, p. 85; a) *Ibid.*, **48**, 1915, p. 822.  
 362. A. ANDOUARD, Engrais, **26**, 1911, p. 915.  
 363. T. PFEIFFER et E. BLANCK, Landw. Vers. Stat., **77**, 1912, p. 36.  
 364. H. CLAUSEN, Deut. Landw. Presse, **39**, 1912, p. 1131 et Illus. Landw. Zeit., **33**, 1913, p. 45.  
 365. V. VON BAUER, cité par BARTMANN (voir 340).  
 366. E. BOULLANGER, Ann. Inst. Pasteur, **26**, 1912, p. 456.  
 367. J. LABERGIERE, Semaine agricole, **26**, 1907, p. 331; a) Rev. de Vitic., **39**, 1913, p. 33.  
 368. J. J. SKINNER et M. X. SULLIVAN, U. S. Dept. Agr. Bul., **42**, 1914, p. 32.  
 369. G. IPPOLITO, L'Agricoltura moderna, **20**, 1914, p. 259.  
 370. R. RICCI et G. BARBERA, Staz. Sper. Agr. Ital., **48**, 1915, p. 677.  
 371. P. POLI, Il Giorn. di Riscicoltura, **5**, 1915, p. 10.  
 372. F. J. CHITTENDEN, Journ. Roy. Hort. Soc. (London), **41**, 1915, p. 94.  
 373. B. SCHULZE, Landw. Vers. Stat., **87**, 1915, p. 1.  
 374. O. FALLADA et J. K. GREISENEGGER, Oesterr. Ungar. Zeitschr. f. Zuckerind. u. Landw., **44**, 1915, p. 379.  
 375. W. E. TOTTINGHAM et A. J. BECK, Plant World, **19**, 1916, p. 359.  
 376. M. POPP, Fühlings Landw. Zeit., **65**, 1916, p. 354.  
 377. L. HILTNER et G. KORFF, Prakt. Bl. Pflanzenbau u. Schutz, **15**, 1917, p. 549; Centrabl. Agr. Chem., **47**, 1918, p. 15.  
 378. H. G. SODERBAUM, Meddel. Centralanst. Forsoksv. Jordbruksomradet, n° 168, 1918, p. 20; résumé dans Centrabl. Agr. Chem., **48**, 1919, p. 136.  
 379. E. P. DEATRICK, New York Cornell Sta. Mem., **19**, 1919, p. 365.  
 380. J. S. MC HARGUE, Journ. Indus. and Engin. Chem., **11**, 1919, p. 332.  
 381. O. SCHREINER et P. R. DAWSON, *Ibid.*, **19**, 1927, p. 400.

382. J. J. SKINNER et R. W. RUPRECHT, *The commercial Fertilizer*, **36**, 1928, p. 34 ; *Florida Sta. Bul.*, **218**, 1930, p. 37.
383. C. R. IYER, R. RAJAGOPALAN et V. SUBRAHMANYAN, *Proc. Indian Acad. Sc.*, **I B**, 1934, p. 106.
384. C. WILLIAMS, *North Carolina Sta. Rpt.*, 1930, p. 47.
385. S. D. CONNER, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **24**, 1932, p. 726.
386. K. SCHARRER et W. SCHROPP, *Zeitschr. Pflanzenern. u. Düng. Bodenk. A*, **36**, 1934, p. 1.
387. B. N. SINGH et S. PRASAD, *Indian J. Agr. Sci.*, **6**, 1936, p. 720.
388. T. E. ODLAND et F. K. CRANDALL, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **24**, 1932, p. 622.
389. C. BRIQX et E. JOUIS, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1934 par les Stat. Agron.*, p. 113.
390. H. P. COOPER, W. D. MOORE et R. WALLACE, *S. Carolina Agr. Expt. Ann. Rpt.*, **47**, 1934, p. 141 ; **48**, 1935, p. 151.
391. P. A. VLASSIUK, *Chem. Soc. Agr.*, n° 5, 1939, p. 55.
392. H. MICHEELS et P. DE HEEN, *Acad. Roy. Belgique, Bull. cl. Sc.*, 1906, n° 5, p. 288.
393. P. CHANCEREL, *Rev. des Eaux et Forêts*, **52**, 1913, p. 208.
394. J. CROCHETTELE, *Journ. Agric. prat.*, nouv. série, **26**, 1913, p. 398.
395. L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, *C. R. Acad. Sc.*, **165**, 1917, p. 45.
396. J. STOKLASA, *Biochem. Zeitschr.*, **91**, 1918, p. 137.
397. A. DEMKINA, *Lein u. Hanf.*, **5**, 1934, p. 25.
398. A. ZLATAROFF, *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **16**, 1934, p. 1720.
399. F. ALLEMAYER, *Die Bedeutung der Manganverbindungen als Düngemittel*, Thèse, Erfurt, Iéna, 1912.
400. U. VARVARO, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **45**, 1912, p. 917.
401. SIGMUND, *Centralbl. f. Agr.*, 1906, p. 810 et 1907, p. 599.
402. J. A. VOELCKER, *Journ. Roy. Agr. Soc. England*, **65**, 1904, p. 306.
403. W. E. BRENCHELEY, *Ann. Botany (London)*, **24**, 1910, p. 571.
404. B. E. GILBERT et F. E. PEMBER, *Plant Physiology*, **6**, 1931, p. 727.
405. W. T. Mc GEORGE, *Hawai Sugar Planters Sta. Agr. and Chem. Bul.*, **49**, 1925, p. 95.
406. J. P. MARTIN, *Hawaiian Planters Record*, **39**, 1935, p. 79.
407. F. C. GERRETSEN, *Ann. Botany*, **1**, 1937, p. 207.
408. L. DELAVIGNE et QUARTAROLI, *Boll. Techn.*, **29**, 1932, p. 77.

#### Manganèse et assimilation chlorophyllienne

409. W. VAN DAM, *Chem. Weekbl.*, **4**, 1907, p. 391.
410. A. CARLIER et H. CLAUSEN, *Ann. Gembloux*, **20**, 1910, p. 423.
411. L. MONTEMARTINI, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **44**, 1911, p. 564.
412. J. S. Mc HARGUE, *Journ. Ind. and Engin. Chem.*, **18**, 1926, p. 172.
413. F. C. GERRETSEN, *Transact. of 3 rd intern. Congr. of Soil Science*, Oxford, 1935, **1**, p. 189.
414. J. STOKLASA, *C. R. Acad. Sc.*, **152**, 1911, p. 1340.
415. F. JADIN et A. ASTRUC, *Ibid.*, **155**, 1912, p. 406 ; *Journ. Pharm. et Chim.*, 7<sup>e</sup> série, **7**, 1913, p. 155.
416. W. B. S. BISHOP, *Aust. Journ. Expt. Biol. and Med. Sc.*, **5**, 1928, p. 125.
417. G. BERTRAND et M. ROSENBLATT, *C. R. Acad. Sc.*, **193**, 1932, p. 405.

#### Manganèse et chlorose des plantes

418. B. E. GILBERT et F. T. Mc LEAN, *Soil Science*, **26**, 1928, p. 27 ; *Rhode Island Sta. Bul.*, **246**, 1934, p. 15.
419. H. E. HONEYWILL et R. A. DUTCHER, *Pennsylvania Sta. Bul.*, **258**, 1930, p. 8.
420. L. G. WILLIS, *North Carolina Agr. Expt. Sta. Bul.*, **257**, 1928, p. 13.
421. H. A. LEE et J. S. Mc HARGUE, *Phytopathology*, **18**, 1928, p. 775.
422. H. J. JENSEN, *Puerto Rico Agr. Expt. Sta. Agric. Notes*, n° 69, 1936, p. 6.
423. I. C. HOFFMAN, *Ohio Sta. Bul.*, **446**, 1930, p. 94 ; *Veg. Growers Assoc. Amer. Ann. Rept.*, 1934, p. 160.
424. D. A. VAN SCHREVEN, *Mededeel. Inst. Suikerbietensteelt*, **6**, 1936, p. 1.
425. G. R. TOWNSEND et H. H. WEDGWORTH, *Florida Agr. Expt. Sta. Bul.*, **300**, 1936, 23 p.
426. J. E. Mc MURTREY jr, *U. S. Dept. Agr. Tech. Bul.*, **340**, 1933, p. 43.
427. A. R. C. HAAS, *Hilgardia*, **7**, 1932, p. 181.
428. R. D. DICKEY et W. REUTHER, *Florida Agr. Expt. Sta. Bul.*, **319**, 1938, p. 3.
429. A. RIPPEL, *Biochem. Zeitschr.*, **140**, 1923, p. 315.

#### Manganèse et maladie des « taches grises » de l'avoine

430. B. SJOLLEMA et J. HUDIG, *Verslag Landouwk. Onderzoek Rijksland landbouw proefstat*, 1909, p. 29.

431. G. SAMUEL et C. S. PIPER, *Journ. Dept. Agr. South Australia*, **31**, 1928, p. 696 et 789.  
 432. D. W. DAWIES et E. T. JONES, *Welsh. Journ. Agr.*, **7**, 1931, p. 349.  
 433. W. B. ALBERT, *S. Carol. Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, **44**, 1931, p. 46 ; *Ibid.*, **45**, 1932, p. 46 ; *Ibid.*, **47**, 1934, p. 45.  
 434. A. S. WILD, *J. Dept. Agr. West. Australia*, **II**, 1934, p. 223.  
 435. J. J. MASCHHAUPT, *Zeitschr. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenkn.*, **13 B**, 1934, p. 878.

*Manganèse et « Marsh-Spot » des pois*

436. H. G. PETHYBRIDGE, *J. Ministry Agric. (England)*, **43**, 1935, p. 55.  
 437. M. P. LÖHNIS, *Tijdschr. Plantenziekten*, **42**, 1936, p. 159.  
 438. C. KOOPMAN, *Ibid.*, **43**, 1937, p. 64.  
 439. A. OVIINGE, *Ibid.*, **43**, 1937, p. 67.  
 440. S. G. HEINTZE, *J. Agr. Sc.*, **28**, 1938, p. 175.  
 441. A. H. LEWIS, *Emp. J. Exper. Agr.*, Oxford, **7**, 1939, p. 150.  
 442. H. L. G. DE BRUYN, *Inst. v. Phytopath. Wageningen. Mededeel.*, **85**, 1939.

*Manganèse et sols acides*

443. W. P. KELLEY, *Hawai Sta. Rpt.*, 1909, p. 58 ; *Ibid.*, 1910, p. 14, 41, 45 ; *Hawai Sta. Bul.*, **26**, 1912, p. 7.  
 444. E. V. WILCOX et W. P. KELLEY, *Hawai Sta. Bul.*, **28**, 1912, 20 p.  
 445. O. M. JOHNSON, *Hawai Sta. Press Bul.*, **51**, 1916, 11 p. ; *Hawai Sta. Bul.*, **52**, 1924, p. 38.  
 446. W. T. MC GEORGE, *Soil Science*, **16**, 1923, p. 269.  
 447. C. E. BORTNER, *Ibid.*, **39**, 1935, p. 15.  
 448. H. VON FEILITZEN, *Journ. f. Landw.*, **55**, 1907, p. 289.  
 449. J. J. SKINNER et F. R. REID, *U. S. Dept. Agr. Bul.*, **441**, 1916, 12 p.  
 450. J. S. MC HARGUE, *Journ. Agr. Research.*, **24**, 1923, p. 781.  
 451. H. G. M. JACOBSON et T. R. SWANBACK, *Science*, **70**, 1929, p. 283.  
 452. R. H. CARR et P. H. BREWER, *J. Indus. and Engin. Chem.*, **15**, 1923, p. 634.  
 453. J. DAVIDSON, *II<sup>e</sup> Congrès intern. Science du sol*, Leningrad-Moscou, 1930, vol. II, Comm. II, p. 84.  
 454. C. OLSEN, *C. R. des trav. du Labor. Carlsberg*, **21**, sér. chim., 1936, p. 129.  
 455. L. C. KAPP, *Arkansas Sta. Bul.*, **349**, 1937, 21 p.

*Divers*

456. S. RHODIN, *K. Landtbr. Akad. Handl. och. Tidsk.*, **47**, 1908, p. 30.  
 457. F. MACH, *Ber. Grossh. Bad. Landw. Vers. Anst. Augustenb.*, 1910, p. 55.  
 458. O. MUNERATI, G. MEZZADROLI et T. ZAPPAROLI, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **47**, 1914, p. 817.  
 459. H. VAGELER, *Landw. Vers. Sta.*, **88**, 1916, p. 159.  
 460. GRANVIGNE, *Rapp. sur les trav. poursuivis dans les Stat. Agron. en 1923*, dans *Ann. Sc. Agron. franç. et étr.*, 1924, p. 217.  
 461. H. J. HUGUES et J. H. RICHES, *J. Dept. Agr. Western Australia*, **9**, 1932, p. 311.

*CUIVRE*

*Action sur les végétaux inférieurs*

462. N. ONO, *Journ. Col. Sc. Imp. Univ. Tokyo*, **13**, 1900, p. 141.  
 463. M. ROBERG, *Jahr. f. wiss. Bot.*, **70**, 1932, p. 311.  
 464. C. A. ELVEHEM, *J. Biol. Chem.*, **90**, 1930, p. 111.  
 465. J. S. MC HARGUE et R. K. CALFEE, *Plant Physiology*, **6**, 1931, p. 559.  
 466. M. JAVILLIER, *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **1**, 1914, p. 55 ; *Ann. des Ferment.*, **5**, 1939, p. 371.  
 467. H. BORTELS, *Biochem. Zeitschr.*, **182**, 1927, p. 301.  
 468. M. ROBERG, *Centralbl. f. Bakt.*, **II**, **74**, 1928, p. 333.  
 469. O. METZ, *Arch. f. Mikrob.*, **1**, 1930, p. 197.  
 470. L. K. WOLFF et A. EMMERIE, *Biochem. Zeitschr.*, **228**, 1930, p. 443.  
 471. R. A. STEINBERG, *Bull. Torrey Botan. Club*, **62**, 1935, p. 81 ; *J. of Agr. Research*, **51**, 1935, p. 413 ; *Amer. J. Botany*, **23**, 1936, p. 227.  
 472. F. YOSHIMURA, *Journ. Fac. Sc. Hokkaido Imp. Univ.*, série V, **4**, 1936, p. 117.

*Emploi du cuivre comme anticryptogamique, herbicide, etc.*

473. A. MILLARDET et U. GAYON, *C. R. Acad. Sc.*, **101**, 1885, p. 657, 692, 929 ; a) *Ibid.*, **104**, 1887, p. 342.
474. P. VIALA, *Rev. de Vitic.*, **1**, 1893, p. 62.
475. A. GIRARD, *C. R. Acad. Sc.*, **114**, 1892, p. 234.
476. E. LAURENT, *Ibid.*, **135**, 1902, p. 1040.
477. E. PARISOT, *Journ. Agr. Prat.*, nouv. série, **8**, 1904, p. 234.
478. B. PRÉVOST, *Mémoire sur la cause immédiate de la carie ou charbon des blés*, Montauban, 1807.
479. M. BIROLAUD, *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 1929, p. 733.
480. G. ARNAUD et M. GAUDINEAU, *Ibid.*, 1929, p. 742 et *Ann. Agron.*, nouv. série, **1**, 1931, p. 61.
481. R. THIELÉ, *Zeitschr. Pflanzenkrank.*, **8**, 1898, p. 70.
482. E. CHUARD, *Chron. Agron.*, canton de Vaud, **13**, 1900, p. 451.
483. F. C. STEWART, H. J. EUSTACE et F. A. SIRRINE, *New York State Sta. Bul.*, **221**, 1903, p. 235.
484. L. RAVAZ et A. BONNET, *Ann. Ecole nat. Agric. Montpellier*, nouv. série, **3**, 1903, p. 157.
485. R. EWERT, *Zeitschr. Pflanzenkrank.*, **22**, 1912, p. 257.
486. A. CADORET, *Le Progrès agric. et vitic.*, **68**, 1918, p. 319.
487. S. CASTANA, *Giornale vinicolo italiano*, **45**, 1919, p. 236.
488. J. D. WILSON et H. A. RUNNELS, *Ohio Sta. Bim. Bul.*, **172**, 1935, p. 13.
489. H. WHETZEL, F. M. BLODGETT et E. O. MADER, *New-York (Cornell) Agr. Expt. Sta.*, **48**, *Ann. Rept.*, 1936, p. 119.
490. C. DUSSERRE, *Ann. Agr. Suisse*, **1**, 1900, p. 331.
491. O. BUTLER et R. BISSEY, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **26**, 1934, p. 693.

*Action du cuivre sur la germination*

492. A. JUNGELSON, *Rev. gén. de Botanique*, **29**, 1917, p. 244 et 261.
493. P. BAILLY, *C. R. Acad. Agric.*, **10**, 1924, p. 1005.
494. M. JAGUENAUD, *Ibid.*, **15**, 1929, p. 770.
495. W. H. EVANS, *U. S. Dept. Agr. Div. of veget. Phys. and Pathol. Bul.*, **10**, p. 24.
496. D. SILBERT, *New Jersey Sta. Rpt.*, 1923, p. 259.
497. A. DENSCH et T. HUNNIUS, *Zeitschr. Pflanz. u. Düng.*, **3**, 1924, p. 369.
498. S. A. BEACH et L. L. VAN SLYKE, *New York State Sta. Bul.*, **41**, nouv. série, 1892, p. 35.
499. J. EFFRONT, *C. R. Acad. Sc.*, **141**, 1905, p. 625.
500. Y. M. POLESHCHUK et S. NEGOWELOV, *Chem. Soc. Agr. (U.R.S.S.)*, 1936, n° 10, p. 94.
501. M. TOKUOKA et M. HITOSHI, *J. Soc. Trop. Agr. Taihoku Imp. Univ.*, **9**, 1937, p. 339.

*Action sur le développement des plantes supérieures*

502. E. GAIN, *Rev. gén. des Sc.*, **29**, 1919, p. 314, d'après *Bull. bibliogr. de Bot. agric. (Univ. de Nancy, fasc. 1, 1917)*.
503. PHILIPPS, *Ann. Chim. et Phys.*, **19**, 1821, p. 76, d'après *Ann. of Philosophy*.
504. A. GIRARD, *C. R. Acad. Sc.*, **120**, 1895, p. 1147.
505. F. PORCHET et E. CHUARD, *Bul. Marith. Soc. Valais Sc. Nat.*, 1904, n° 33, p. 204.
506. A. TSCHIRCH, *Toxikologie und Hygiène*, résumé dans *Chem. Zeitung.*, **18**, 1894, n° 102, Rép. p. 329.
507. STEGLISH, *Berg. Tat. Landw.*, abt. K, *Vers. Stat. Pflanzenkult.*, Dresde, 1903, p. 4.
508. J. SIMON, *Landw. Vers. Sta.*, **71**, 1909, p. 417.
509. J. A. VOELCKER, *Journ. of the Roy. Agr. Soc. of England*, **74**, 1913, p. 411 ; *Ibid.*, **75**, 1914, p. 306.
510. H. VON FEILITZEN, *Svenska Mosskulturfor. Tidskr.*, **31**, 1917, p. 16 et 129.
511. M. MIÈGE, *C. R. Acad. Sc.*, **164**, 1917, p. 362.
512. W. H. HARRISON et P. A. SUBRAHMANYA AYYAR, *Madras Agr. Dept. Yearbook*, 1917, p. 55.
513. M. TOKUOKA et M. HITOSHI, *J. Soc. Trop. Agr. Taihoku Imp. Univ.*, **9**, 1937, p. 339 ; a) *Ibid.*, p. 350.
514. R. H. FORBES, *Univ. California Pubs. Agr. Sc.*, **1**, 1917, p. 395.
515. E. TRUOG et J. SYKORA, *Soil Science*, **3**, 1917, p. 333.
516. L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, *C. R. Acad. Sc.*, **170**, 1920, p. 87 ; a) *Ibid.*, **170**, 1920, p. 420 ; b) *Ibid.*, **166**, 1918, p. 89 ; c) *Ibid.*, **170**, 1920, p. 1542 et **171**, 1920, p. 210.
517. H. COUPIN, *C. R. Acad. Sc.*, **127**, 1898, p. 400.

518. M. KANDA, *Journ. Col. Sc. Imp. Univ. Tokyo*, **19**, 1904, p. 47 ; résumé dans *Bot. Centralbl.*, **95**, 1904, p. 538.
519. W. E. BRENCHELEY, *Ann. Botany* (London), **24**, 1910, p. 571.
520. J. S. CALDWELL, *Science*, nouv. série, **39**, 1914, p. 293.
521. H. DEVAUX, *C. R. Acad. Sc.*, **132**, 1901, p. 717.
522. C. B. LIPMAN et G. MACKINNEY, *Plant Physiology*, **6**, 1931, p. 593.
523. A. L. SOMMER, *Ibid.*, **6**, 1931, p. 339.
524. K. SCHARRER et W. SCHROPP, *Zeitschr. Pflanzenern. Düng. u. Bodenk.*, **32**, 1933, nos 3-4, A, p. 184.
525. Th. ARND et W. HOFFMANN, *Landw. Vers. Sta.*, **129**, 1937, p. 571.
526. P. DEHÉRAIN et E. DEMOUSSY, *C. R. Acad. Sc.*, **132**, 1901, p. 523 ; *Ann. Agron.*, **27**, 1901, p. 553.
527. C. OLSEN, *C. R. Labor. Carlsberg*, sér. chim., **23**, 1939, n° 5.
528. L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 6<sup>e</sup> série, 1921, p. 115.
529. G. JORET et H. MALTERRE, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1936 par les Stat. Agron.*, p. 155 ; a) *Ibid.*, 1938, p. 226.
530. M. F. MORGAN et O. E. STREET, *Connecticut Agr. Expt. Sta. Bul.*, **410**, 1938, p. 393.

#### *Action du cuivre sur la végétation des sols humifères*

531. C. MEIJER, *Verslag. landb. Onderzoek.*, **40** A, 1934, p. 67.
532. J. R. PILAND et L. G. WILLIS, *Journ. Am. Soc. Agron.*, **29**, 1937, p. 324 ; *Soil Science*, **44**, 1937, p. 251.
533. M. F. HILL et O. C. BRYAN, *Journ. Am. Soc. Agron.*, **29**, 1937, p. 809.
534. O. C. BRYAN, *Journ. Am. Soc. Agron.*, **21**, 1929, p. 923.
535. R. RUSSEL et T. F. MANNS, *Trans. Peninsula Hort. Soc.*, **23**, 1933, p. 51.
536. M. D. BAKHULIN, *Chem. Soc. Agr.*, 1934, n° 7, p. 48 ; d'après *Chem. Centr.*, 1934, II, p. 4012.
537. A. V. ZENYUK, *Lenin Acad. Agric. Sc.*, 1937, p. 94.
538. F. GIESECKE et W. LESCH, *Landw. Vers. Stat.*, **125**, 1936, p. 229.
539. F. STEEBJERG, *Tidskr. f. Plant.*, Copenhague, **45**, 1940, n° 2, p. 259.

#### *Cuivre et « maladie de réclamation »*

540. J. HUDIG, C. MEYER et J. GOODIJK, *Zeitschr. f. Pflanzenernähr. u. Düng. A*, **8**, 1926-27, p. 14.
541. B. RADEMACHER, *Deutsch. Landw. Pr.*, **61**, 1934, p. 581 ; *Flugbl. Biol. Reichsanst.*, **137**, 1935, p. 4 ; *Arb. biol. Reich. Land-Forstw.*, Berlin-Dahlem, **21**, 1936, p. 531 ; *Z. Pflanzenkrankh. u. Pflanzensch.*, **47**, 1937, p. 545.
542. E. BRANDENBURG, *Angew. Bot.*, **16**, 1934, p. 505 ; *Mededeel. Inst. Suikerbiet.*, **9**, 1935, p. 245.
543. F. VIESCHLAG, *Deut. Landeskult. Zeitung.*, **4**, 1935, p. 14.
544. S. UNDENAS, *Lantbruks-Hogskol. Ann.*, **4**, 1937, p. 99.
545. D. S. RICEMAN et C. M. DONALD, *Australia Council Sc. Ind. Research*, P. n° 78, 1938, p. 7.
546. C. S. PIPER, *Ibid.*, p. 24.
547. W. HOFFMANN, *Bodenk. u. Pflanzenern.*, **13**, 1939, p. 139.
548. W. NICOLAISEN, W. SEELBACH et B. LEITZKE, *Ibid.*, **13**, 1939, p. 156.
549. W. NICOLAISEN, *Ibid.*, **20**, 1941, p. 207.
550. F. NIESCHLAG et H. WESTERHOFF, *Ibid.*, **20**, 1941, p. 225.

#### *Cuivre et « Dieback » ou « Exanthème » des arbres fruitiers*

551. T. C. DUNNE, *J. Dept. Agr. W. Australia*, **15**, 1938, p. 120.
552. J. OSERKOWSKY et H. E. THOMAS, *Science*, **78**, 1933, p. 315.
553. R. E. SMITH et H. E. THOMAS, *Phytopathology*, **18**, 1928, p. 449.
554. V. CAHILL, *Journ. Dept. Agr. West. Austr.*, **6**, 1929, p. 388.
555. B. F. FLODY, *Florida Sta. Bul.*, **140**, 1917, p. 31.
556. F. C. MC CLEERY, *Agr. Gaz. N. S. Wales*, **40**, 1929, p. 397 et 523.
557. B. R. FUDGE, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1933, p. 137 ; *Ibid.*, 1934, p. 81 ; *Ibid.*, 1936, p. 108.
558. A. R. C. HAAS et H. J. QUAYLE, *Hilgardia*, **9**, 1935, p. 143.
559. H. A. PITTMANN, *Journ. Dept. Agr. West. Austr.*, **13**, 1936, p. 187.

#### *Cuivre et chloroses diverses*

560. O. S. ORTH, G. C. WICKWIRE et W. E. BURGE, *Science*, **79**, 1934, p. 33.
561. E. L. SPENCER, *Phytopathology*, **25**, 1935, p. 1067.

562. W. E. ISAAC, *Trans. Roy. Soc. S. Africa*, **22**, 1934, p. 187.  
563. F. G. ANDERSEN, *Journ. Pomol. and Hort. Sc.*, **10**, 1932, p. 130.

*Cuivre et chlorophylle*

564. H. L. BOLLEY, *North Dakota Sta. Rpt.*, 1908, **1**, p. 42.  
565. A. DENSCH et T. HUNNIUS, *Zeitschr. Pflanzenern. u. Düng.*, **3**, 1924, p. 369.  
566. H. F. BERGMAN et W. E. TRURAN, *Mass. Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1936, B. 339, p. 40.  
567. U. SARATA, *Japan J. Med. Sc. II. Biochem.*, **3**, 1937, p. 197.  
568. L. MONTEMARTINI, *Riv. di Patologia veget.*, **10**, 1920, p. 36.

*Autres actions physiologiques du cuivre*

569. L. MONTEMARTINI, *Rendic. del R. Istituto Lombardo di Scienze et Lettere*, vol. 60, 1927, d'après *Rev. intern. Renseign. agric.*, **18**, 1927, p. 394 T.  
570. H. VON WITSCH, *Jahrb. wiss. Botan.*, **83**, 1936, p. 340.

ZINC

*Action accidentelle du zinc sur la végétation*

571. H. LUNDEGARDH, *Kgl. Landtbruks. Akad. Handl. Tid.*, **66**, 1927, p. 626, d'après *Chem. Abstr.*, **22**, 1928, p. 476.  
572. P. DOPTER, *C. R. Acad. Agric.*, **15**, 1929, p. 1067.  
573. P. EHRENBURG, *Landw. Vers. Stat.*, **72**, 1910, p. 15 ; d'après *Chem. Abstr.*, **4**, 1910, p. 1212.  
574. K. GEDROIZ, *Selsk. Khoz. i. Liesov.*, **74**, 1914, p. 625, d'après *Bull. mens. rens. agric. (Inst. int. Agr. Rome)*, **6**, 1915, p. 58.  
575. S. D. CONNER, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **12**, 1920, p. 61.  
576. W. F. CROSIER, S. R. PATRICK et M. T. MUNN, *Phytopathology*, **27**, 1937, p. 867.

*Emploi du zinc en phytopathologie*

577. W. H. CHANDLER, D. R. HOAGLAND et P. L. HIBBARD, *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **29**, 1932, p. 255 ; **30**, 1933, p. 70 ; **31**, 1934, p. 11 ; **33**, 1936, p. 131.  
578. A. H. FINCH, *Ibid.*, **29**, 1932, p. 264.  
579. A. O. ALBEN, J. R. COLE et R. D. LEWIS, *Phytopathology*, **22**, 1932, p. 979.  
580. E. L. OVERHOLSER, L. L. CLAYPOOL et F. L. OVERLEY, *Proc. Washington St. Hort. Assoc.*, **28**, 1932, p. 160.  
581. J. B. DEMAREE, E. D. FOWLER et H. L. CRANE, *Nation. Pecan Assoc. Bul. Rept. Proc.*, **32**, 1933, p. 90.  
582. W. S. BALLARD et R. C. LINDLER, *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **31**, 1934, p. 1.  
583. I. DE V. MALHERBE, *Farming s. Africa*, **9**, 1934, p. 312.  
584. O. T. Mc WHORTER, *Oregon State Hort. Sc. Ann. Rept.*, **26**, 1934, p. 56.  
585. G. H. BLACKMON, *Florida Agr. Exp. Sta. Ann. Rept.*, 1935, p. 74 et 1936, p. 75.  
586. A. O. ALBEN et H. M. BOGGS, *Soil Science*, **41**, 1936, p. 329.  
587. J. C. JOHNSTON, *California Citrograph*, **18**, 1933, p. 107.  
588. A. F. CAMP, *Proc. Florida St. Hort. Soc.*, 1934, p. 33.  
589. J. DUFRÉNOY et H. S. REED, *Ann. Agron.*, nouv. série, **4**, 1934, p. 637.  
590. E. R. PARKER, *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.*, **31**, 1934, sup. p. 98 ; **33**, 1936, p. 82 ; **34**, 1937, p. 213 ; **35**, 1938, p. 217.  
591. H. S. REED et E. R. PARKER, *Journ. Agr. Research*, **53**, 1936, p. 395 ; *Calif. Citrogr.*, **22**, 1937, p. 411.  
592. I. MATHEWS, *Citrus Grower*, 1935, n° 41, p. 30.  
593. H. C. POWELL et I. MATHEWS, *Univ. Pretoria*, série I, n° 35, 1936, 14 p.  
594. J. R. NELLER et B. E. ROBERTSON, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1936, p. 127.  
595. H. D. CHAPMAN, A. P. VANSELOW et G. F. LIEBIG, *Journ. Agr. Research*, **55**, 1937, p. 365.  
596. R. M. BARNETT, J. P. CAMP et J. D. WARNER, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1934, p. 49 ; 1935, p. 45 ; 1936, p. 60 ; *Soil Science*, **39**, 1935, p. 145.  
597. H. MOWRY et A. F. CAMP, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1933, p. 91 ; 1934, p. 62.  
598. A. G. PLAKIDAS, *Louisiana Agr. Expt. Sta. Bull.*, **282**, 1937, p. 2.  
599. J. DUFRÉNOY, *C. R. Soc. Biol.*, **118**, 1935, p. 156.

*Action du zinc sur les végétaux inférieurs*

600. A. RICHTER, *Centralbl. Bakt.* II, **7**, 1901, p. 417.
601. M. JAVILLIER, *C. R. Acad. Sc.*, **145**, 1907, p. 1212; **146**, 1908, p. 365; **152**, 1911, p. 900 et 1337; **154**, 1912, p. 383; **155**, 1912, p. 190; **156**, 1913, p. 406; **158**, 1914, p. 1216; *Ann. Inst. Pasteur*, **22**, 1908, p. 720; **26**, 1911, p. 515; **27**, 1913, p. 1021; *Bull. Sc. Pharm.*, **14**, 1907, p. 694; **15**, 1908, p. 129 et 559; **18**, 1911, p. 321; **19**, 1912, p. 513; **20**, 1913, p. 321; **21**, 1914, p. 278. a) *Recherches sur la présence et le rôle du zinc chez les végétaux*, Thèse Faculté Sciences, Paris, 1908, p. 51 (L. Déclume, édit., Lons-le-Saunier); b) *Ibid.*, p. 100 et suiv.
602. M. LATHAM, *Bul. Torrey Bot. Club*, **36**, 1909, p. 235.
603. J. BUROMSKY, *Ann. Inst. Agron. Moskau*, **17**, 1911, p. 109; *Centralbl. Bakt.* II, **36**, 1912, p. 54.
604. H. J. WATERMAN, *K. Akad. Wetensch. Amsterdam. Proc. Sect. Sc.*, **15**, 1913, 2, p. 1349.
605. R. A. STEINBERG, *Bull. Torrey Bot. Club*, **46**, 1919, p. 1; *Bot. Gaz.*, **70**, 1920, p. 465.
606. M. ROBERG, *Centralbl. Bakt.* II, **84**, 1931, p. 196; *Ber. ges. Physiol.*, **65**, 1932, p. 641.
607. G. LOHMANN, *Arch. Mikrobiol.*, **5**, 1934, p. 31.
608. K. PIRSCHLE, *Planta, E. Z. Wiss. Biol.*, **23**, 1934, p. 177.
609. O. KAUFFMANN-COSLA et R. BRULL, *Arch. intern. Pharmacod.*, **57**, 1937, p. 188.
610. S. G. WAKSMAN et J. W. FOSTER, *C. R. Acad. Sc.*, **207**, 1938, p. 483.

*Action du zinc sur le développement des plantes supérieures*

611. W. KNOP, *Landw. Vers. Stat.*, **1**, 1860, p. 9.
612. REICHHARDT, *Ann. d. Landw.*, **50**, 1867, p. 235.
613. M. FREITAG, *Mitth. Koenig Landw. Akad. Poppelsdorf*, 1868, p. 82; *Vierteljahresschr. für prakt. Pharm.*, **19**, 1870, p. 427.
614. F. STORP, *Landw. Jahresh.*, 1883, p. 795.
615. KÖNIG, *Berichte d. Vers. Stat. Münster*, 1881, p. 45.
616. KRAUCH, *Journ. f. Landw.*, **30**, 1882, p. 271.
617. A. BAUMANN, *Landw. Vers. Stat.*, **31**, 1885, p. 1.
618. E. HASELHOFF et F. GOSSEL, *Zeitschr. Pflanzenkrank.*, **14**, 1904, p. 193.
619. M. JAVILLIER, *Orig. Commun. 8, Internat. Congrès Appl. Chem., Washington and New-York*, **15**, 1912, S. VII, p. 145.
620. J. A. VOELCKER, *Journ. Roy. Agr. Soc. England*, **73**, 1912, p. 314.
621. P. MAZÉ, *Ann. Institut Pasteur*, **27**, 1913, p. 661.
622. A. L. SOMMER, *Plant Physiology*, **3**, 1928, p. 217.
623. K. SCHARER et W. SCHROPP, *Zeits. f. Pflanzenern. Düng. u. Bodenk. A*, **34**, 1934, p. 15.
624. E. O. GALL, *Citrus Ind.*, **17**, 1936, p. 20.
625. D. V. VAN SCHREVEN, *Meded. Inst. Suikerbielen*, **7**, 1937, n° 1, 26 p.
626. A. H. MARMON, *Florists' Rev.*, **80**, 1937, p. 19.

*Zinc et activité physiologique des végétaux*

627. B. SILBERBERG, *Bul. Torrey Bot. Club.*, **36**, 1909, p. 480.
628. W. ZALESKI et A. REINHARD, *Biochem. Zeitschr.*, **23**, 1909, p. 193.
629. M. GRACANIN, *Biochem. Zeitschr.*, 1928, 1-3, p. 215.
630. G. BERTRAND et M. ANDREITCHOVA, *C. R. Acad. Sc.*, **197**, 1933, p. 1374.

*Divers*

631. O. E. GALL et R. M. BARNETTE, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **32**, 1940, p. 23.
632. H. W. JONES, O. E. GALL et R. M. BARNETTE, *Agr. Expt. Sta. Gainesville (Florida)*, 1936, *Bull.* **298**, p. 1.

*PLOMB*

633. J. A. VOELCKER, *Journ. of the Roy. Agric. Soc. of England*, **75**, 1914, p. 312; a) *Rothamsted Expt. Sta. Harpenden Rpt.*, 1923-24, p. 89.
634. A. STUTZER, *Blätt. Zuckerrubensbau*, **20**, 1913, p. 209; a) *Deutsch. Landw. Presse*, **41**, 1914, p. 1; b) *Journ. f. Landwirtschaft.*, **64**, 1916, p. 1.
635. J. STOKLASA, *C. R. Acad. Sc.*, **156**, 1913, p. 153.
636. K. J. GREISENEGGER, *Osterr. Ungar. Zeitschr. Zuckerindus. u. Landw.*, **44**, 1915, p. 91.
637. J. J. GRIFFITH, *Journ. Agr. Sc.*, **9**, 1919, p. 366.

638. E. BONNET, *C. R. Acad. Sc.*, **174**, 1922, p. 488.
639. J. DE RUFZ DE LAVISON, *Ann. Sc. Natur.*, Botan., 9<sup>e</sup> série, **14**, 1911.
640. R. A. BERRY, *Journ. Agr. Sc.*, **14**, 1924, p. 58.
641. S. PRAT, *Bull. Soc. Bot. tchécoslovaque*, **6**, 1928, p. 72.
642. S. PRAT, J. BABICKA et J. POLIVKOVA, *Fac. d. Sc. Univ. Charles* (Prague), **121**, 1932, p. 24.
643. L. MAROTTA, *Atti Accad. Lincei*, **23**, 1936, p. 515.
644. F. S. HAMMET, *Protoplasma*, **4**, 1928, p. 183.
645. J. T. DUNN et H. C. L. BLOXAM, *Journ. Soc. Chem. Ind. Trans.*, **51**, 1932, p. 100 T.
646. K. SCHARRER et W. SCHROPP, *Zeits. f. Pflanz.*, **43**, 1936, p. 34.
647. C. M. KEATON, *Soil Science*, **43**, 1937, p. 401.
648. C. B. LIPMAN et W. F. GERICKE, *Univ. California pubs. agr. sc.*, **1**, 1917, p. 495.
649. M. C. HOOPER, *Ann. Appl. Biol.*, **24**, 1937, p. 690.

## II. — Expériences personnelles

### MÉTHODE\* EXPÉRIMENTALE

650. P. JOLIBOIS, H. BURGEVIN, G. GUYON et A. BOULLÉ, *C. R. Acad. Sc.*, **201**, 1935, p. 1420.

### DÉTAILS TECHNIQUES

#### Choix du sol

651. D. LEROUX, *C. R. Acad. d'Agric.*, **20**, 1934, p. 122 ; *Ahn. Agron.*, nouv. série, **4**, 1934, p. 26 et 159.

#### Analyse du sol

652. A. DEMOLON et D. LEROUX, *Guide pour l'Etude expérimentale du Sol* (Gauthier-Villars, édit.), Paris, 1933, p. 67; a) p. 170; b) p. 151; c) p. 174; d) p. 180; e) p. 183; f) p. 187; g) p. 190; h) p. 202; i) p. 193; j) p. 195; k) p. 61; l) p. 161.
653. S. A. WAKSMAN, *Soil Science*, **30**, 1930, p. 97.
654. H. A. LUBS et W. M. CLARKE, *J. Wash. Acad. Sc.*, **5**, 1915, p. 609 et **6**, 1916, p. 481.
655. C. BRIOUX, *Ann. Sc. Agron. franç. et étr.*, 1922, p. 82.
656. A. DEMOLON, *C. R. Acad. Agric.*, **19**, 1933, p. 535.
657. G. JORET, *Ann. Agron.*, nouv. série, **2**, 1932, p. 170.
658. R. CHAMINADE et J. BOUCHER, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1939 par les Stat. Agron.*, p. 44.
659. A. DEMOLON, *Recherches physico-chimiques sur la terre à briques envisagée comme milieu naturel*, Thèse Fac. Sc., Paris, 1926 (A. Blanchard, édit.), p. 48; a) p. 44; b) p. 45; c) p. 58.
660. DROSDOF et E. TRUOG, *Journ. of Amer. Soc. Agron.*, 1935, p. 312 et *III<sup>e</sup> Congrès intern. de la Science du sol*, Oxford, 1935, vol. I, p. 93.
661. C. BRIOUX et E. JOUIS, *Bull. Assoc. franç. pour l'étude du sol*, **2**, 1936, p. 288.
662. G. BARBIER, *Ibid.*, **2**, 1936, p. 283.
663. G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN, *Ann. Sc. Agron. franç. et étr.*, 1927, p. 71.
664. R. GUILLIN, *Analyses agricoles* (Baillière, édit.), 2<sup>e</sup> édit., Paris, 1919, p. 37 et suiv.
665. J. GUÉRILLOT, *Contribution à l'étude du chlore en biochimie végétale* (E. Le François, édit.), Paris, 1937, p. 52.
666. P. PICHARD, *C. R. Acad. Sc.*, **128**, 1899, p. 615.
667. A. NEMEC, *Zeitsch. f. Pflanz.*, **33**, 1934, p. 346.
668. S. RAVIKOVITCH et N. BIDNER, *Empire J. Expt. Agr.*, **5**, 1937, p. 197.
669. G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN, *Ann. Sc. Agron. franç. et étr.*, 1927, p. 274.
670. G. BERTRAND et L. SILBERSTEIN, *C. R. Acad. Sc.*, **208**, 1939, p. 1453.
671. A. CARNOT, *Ibid.*, **114**, 1892, p. 750.
672. H. HERLEMONT et J. DELABRE, *Ibid.*, **196**, 1933, p. 1502.
673. C. S. SLATER, R. S. HOLMES et H. G. BYERS, *United States Department of Agriculture*, Washington D. C. Technical Bulletin n° 552, janvier 1937, p. 16.
674. E. TRUOG et A. H. MEYER, *Ind. and Eng. Chem.*, anal. éd. I, 1929, n° 3, p. 136.
675. J. S. Mc HARGUE, *J. Assoc. Offic. Agr. Chem.*, **14**, 1931, p. 138.
676. R. L. ANDREW : *The Analyst*, **55**, 1930, p. 269.
677. R. V. NORRIS et D. A. RAMA RAO, *Journ. Ind. Inst. Sc. A*, **11**, p. 75, d'après *Chem. Centralbl.*, **99**, vol. 2, 1928, n° 22.
678. W. F. HILLEBRAND, *The analysis of Silicate and carbonate Rocks*, U. S. Geol. Survey, Bull., **700**, 1919.
679. D. BRARD, *Toxicologie du Chrome*, Actualités scientifiques et industrielles, n° 228 (Hermann et Cie, édit.), Paris, 1935, p. 31.

680. CAZENEUVE, *Bull. Soc. Chim.*, **23**, 1900 (3), p. 701.  
681. G. BERTRAND, *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 1924, n° 5, p. 305.  
682. G. BERTRAND et L. MOKRAGNATZ, *Ibid.*, 1923, n° 3, p. 179 et n° 4, p. 218.  
683. G. BERTRAND et Y. OKADA, *Ann. Agron.*, nouv. série, **3**, 1933, p. 307.

Présence des « Oligo-éléments » dans le sol

BORE

684. F. TERLIKOWSKI et B. NOWICKI, *Roczniki Nauk Roln i. Lensu.*, **28**, 1932, p. 135.  
685. G. LUCHETTI, *Boll. della Facoltà di Agraria, Pisa*, **14-16**, 1938, p. 177.

FLUOR

686. W. O. ROBINSON, *U. S. Dept. Agric. Bull.*, 1914, n° 122, broch. de 27 pages.  
687. L. A. STEINKENIG, *Journ. of Indus. and Engin. Chem.*, **11**, 1919, p. 463.

ARSENIC

688. W. P. HEADDEN, *Color. Sc. Soc. Proc.*, **9**, 1910, p. 345.  
689. J. E. GREAVES, *Biochem. Bull.*, **2**, 1913, p. 519 ; a) *Soil Science*, **38**, 1934, p. 355.  
690. J. S. Mc HARGUE, *Actes de la IV<sup>e</sup> Conférence internat. de Pédologie, Rome*, 12 mai 1924, vol. 3, p. 622.  
691. G. ZUCCARI, *Gaz. Chim. Ital.*, **43**, 1913, II, p. 398.  
692. I. F. REICHERT et R. A. TRELLES, *An. Assoc. Quim. Argentina*, **9**, 1921, p. 89 et *Rev. Facult. Agron. Buenos-Aires*, **3**, 1921, p. 281.  
693. K. HIRAI et K. TCHIRO, *J. Sc. Soil Manure Japan*, **12**, 1938, p. 282.  
694. R. HERMANN et H. KRETZDORN, *Bodenk.*, **13**, 1939, nos 3-4, p. 169.

IODE

695. A. CHATIN, *C. R. Acad. Sc.*, **35**, 1852, p. 510.  
696. Th. VON FELLEBERG, *Biochem. Zeitschr.*, **152**, 1924, p. 152.  
697. J. H. MITCHELL, J. D. WARNER et K. S. MORROW, *South Carolina Agr. Exp. Sta. Bul.*, **252**, 1928, p. 1.  
698. J. BECK, *Zeitsch. f. Pflanzenern. Düng. u. Bodenk.*, **16**, 1930, A, p. 57.  
699. J. S. Mc HARGUE et D. W. YOUNG, *Soil Science*, **35**, 1933, p. 425.  
700. J. F. REITH, *Zeitsch. Pflanzenern. Düng. u. Bodenk.*, **31**, 1933, A, p. 215.  
701. K. SCHARRER, *Ibid.*, **39**, 1935, p. 315.  
702. L. SMOLIK, *Sbornik. Ceskoslov. Akad. Zemedelske*, **10**, 1935, p. 36.  
703. A. ITANO et Y. TSUJI, *Proc. Imp. Acad. (Tokyo)*, **10**, 1934, p. 524 ; *Ber. des Ohara Inst. f. Landw. Forsch.*, **6**, 1934, p. 371.  
704. K. HIRAI et B. TAKAJI, *Bul. Sc. Fakultat. Terkultura, Kjusu Imp. Univ.*, **7**, 1937, p. 245.

CHROME

705. W. O. ROBINSON, G. EDDINGTON et H. G. BYERS, *U. S. Dept. Agr. Tech. Bull.*, **471**, 1935, brochure de 28 pages.  
706. W. THOMAS, *Soil Science*, **15**, 1923, p. 1.  
707. A. DINGWALL et H. T. BEANS, *Journ. Amer. Chem. Soc.*, **56**, 1934, p. 1666.

MANGANÈSE

708. G. BERTRAND, *Les engrais catalytiques et la culture de la betterave* (Congrès de l'Assoc. des Chim. de sucrerie et de distillerie, Paris, 4 et 5 avril 1910), broch. (Imprim. comm. et agric., Compiègne, 1911).  
709. P. DE SORNAY, cité par P. BONAME, *Stat. Agron. Mauritius, Bul.* **20**, 1909, p. 30.  
710. P. DE SORNAY, *Bull. Assoc. Chim. Sucre et Dist.*, **30**, 1912, p. 96.  
711. A. CONTINO, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **33**, 1911, p. 51.  
712. O. M. SHEDD, *Journ. Indus. and Engin. Chem.*, **6**, 1914, p. 660.  
713. A. K. BRYNILDSEN, *Tidskrift Kem. Farm. Terapi*, **12**, 1915, p. 317.  
714. K. KRUMINS, *Acta Universitatis Latviensis (Riga)*, **2**, 1931, p. 109.  
715. L. J. TEAKLE, A. J. HOARE et I. THOMAS, *J. Dept. Agr. Western Australia*, **10**, 1933, p. 340.  
716. A. W. BLAIR et A. L. PRINCE, *Soil Science*, **42**, 1936, p. 327.  
717. A. L. S. RAO, *Current Sc.*, **6**, 23, 1937.  
718. R. CHAVASTELON, *C. R. Acad. Agric.*, **9**, 1923, p. 381.  
719. G. JORET et H. MALTERRE, *Ann. Agron.*, nouv. série, **5**, 1935, p. 512.

CUIVRE

720. L. MAQUENNE et E. DEMOUSSY, *C. R. Acad. Sc.*, **169**, 1919, p. 937 ; *Bull. Soc. Chim. de France*, série 4, **27**, 1920, p. 266 ; *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 6<sup>e</sup> série, 1921, p. 131.

ZINC

721. DIEULAFAIT, *Ann. Chim. et Phys.*, 5<sup>e</sup> série, **21**, 1880, p. 256.  
722. C. MONTANARI, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, **54**, 1921, p. 11.  
723. M. MOKRAGNATZ, *Thèse Faculté Sciences*, Paris, 1922 (édit. de la « Vie Universitaire » p. 47 et suiv.  
724. H. LUNDEGARDH, *Meddel. Centralaust. Forsoksv. Jordbruksomradet* (Suède), **326**, 1927, p. 14.

PLOMB

725. G. BERTRAND et Y. OKADA, *C. R. Acad. Sc.*, **196**, 1933, p. 826.  
726. K. HIRAI et B. TAKAJI, *Bul. Sc. Fakultat. Terkultura, Kjusu Imp. Univ.*, **7**, 1937, p. 239.

Remarques de Physiologie végétale

727. G. ANDRÉ, *C. R. Acad. Sc.*, **133**, 1901, p. 1229.  
728. G. BERTRAND, *C. R. Acad. Agric.*, **13**, 1927, p. 838.  
729. J. B. BOUSSINGAULT, *C. R. Acad. Sc.*, **58**, 1864, p. 881 et 917 ; *Ann. Sc. Natur.*, 5<sup>e</sup> série, I, 1864 (Botan.), p. 314 ; *Ann. Chim. et Phys.*, 4<sup>e</sup> série, **13**, 1868, p. 219.

CONCLUSIONS

Rapports des « Oligo-éléments » avec le sol

730. C. ANTONIANI, *Chemistry and Industry*, **47**, 1928, p. 63 ; *Atti r. Acad. Linc.*, **6**, 1927, p. 107.  
731. C. BRIOUX et E. JOUIS, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1935 par les Stat. Agron.* ; *Ann. Agron.*, nouv. série, **6**, 1936, p. 308.  
732. F. M. EATON et L. V. WILCOX, *U. S. Dept of Agriculture, Techn. Bull.*, **696**, 1939, 57 pages.  
733. E. V. BOBKO, T. V. MATVEA, T. D. DOUBACHOVA et A. I. PHILIPPOV, *Ann. Agron.*, nouv. série, **6**, 1936, p. 691.  
734. J. A. NAFTEL, *American Fertilizer*, **89**, 1938, 5-8, 24-26.  
735. P. NOTTIN, *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 1920, p. 232.  
736. A. QUARTAROLI, *Annali Chim. Appl.*, **17**, 1927, p. 384.  
737. L. G. WILLIS, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, **23**, 1932, p. 1050.  
738. A. L. PRINCE et S. J. TOTH, *Soil Science*, **46**, 1938, p. 83.  
739. E. R. PURVIS et R. W. RUPRECHT, *Florida Agr. Expt. Sta. Ann. Rept.*, 1934, p. 50.

DEUXIÈME PARTIE

« Oligo-éléments » et qualité des récoltes

GÉNÉRALITÉS

740. H. GESLIN, *Ann. Agron.*, nouv. série, **5**, 1935, p. 205.  
741. R. DIEHL, *Ibid.*, nouv. série, **5**, 1935, p. 219.  
742. G. GUYON, *Ibid.*, nouv. série, **5**, 1935, p. 240.  
743. H. BURGEVIN, *Rapport présenté aux « Journées des Engrais »* (Société de Chimie industrielle), Paris, novembre 1938.  
744. M. JAVILLIER et O. GAUDIN, *Chim. et Indust.*, **39**, 1938, p. 211.

I. — Travaux antérieurs

BORE

745. C. BRIOUX et E. JOUIS, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1936 par les Stat. Agron.*, p. 139.  
746. G. JORET et H. MALTERRE, *Ibid.*, 1936, p. 141 et 1938, p. 223 ; a) *Ibid.*, 1937, p. 189.  
747. K. SCHARRER et W. SCHROPP, *Landw. Jahrb.*, **79**, 1934, p. 977.  
748. O. SMITH et L. B. NASH, *Amer. Soc. Hort. Sc., Proc.*, **34**, 1937, p. 530.

CHROME (et manganèse)

749. I. K. ONISHCHENKO et P. A. VLASYUK, *Nauch. Zapiski Sakharnoi Prom.*, **37-38**, 1934, p. 157.

MANGANÈSE

750. L. P. MILLER, *Amer. Journ. Bot.*, **20**, 1933, p. 621.  
 751. C. DUSSERRE, *Ann. Agron. de la Suisse*, 1913, p. 415 et 1914, p. 258.  
 752. O. FALLADA et J. K. GREISENEGGER, *Oesterr. Ungar. Zeitsch. f. Zuckerind. u. Landw.*, **46**, 1917, p. 13.  
 753. K. ULRICH, *Blätter f. Ruberbau*, 1917, p. 31.  
 754. K. DE HAAN, *Mededeel. Inst. Suikerbiet.*, **5**, 1934, p. 123.  
 755. P. E. TURNER, *Proc. Sugar Cane Investig. Comm. (Trinidad)*, **4**, 1933, p. 24.  
 756. S. SLJFERT, *Vestnik* **5**, *Sjez. Ces. Lek. Prir.*, 1915, p. 411 ; résumé dans *Bot. Centralbl.*, **129**, 1915, p. 376.  
 757. C. F. FELLERS, *Soil Science*, **6**, 1918, p. 81.  
 758. L. THÉRON, *Thèse Fac. Sc.*, Dijon, 1935 (Louis-Jean, édit., Gap).  
 759. DELORME, cité par H. BARTMANN, *Journ. Agr. prat.*, nouv. série, **19**, 1910, p. 115.  
 760. S. CÉTTOLINI, *Boll. Quind. Soc. d. Agric. Ital.*, 1915, p. 431.  
 761. F. A. SANNINO et A. TOSATTI, *Att. R. Accad. Lincei, Sc. Fis. Mat. e. Nat.*, **22**, 1913, II, p. 237.  
 762. W. R. ROY, *Proc. 50 th Ann. Meeting Florida State Hort. Soc.*, 1937, p. 29.  
 763. J. J. SKINNER, G. M. BAHRT et A. E. HUGHES, *Proc. Florida St. Hort. Soc.*, 1934, p. 9.  
 764. J. RAY et G. PRADIER, *Journ. Agr. prat.*, nouv. série, **18**, 1909, p. 311.  
 765. J. BORDAS et L. THÉRON, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1934 par les Stat. Agron.*, p. 114 ; *Ibid.*, 1935, p. 123.  
 766. G. KOCH et J. R. BUTLER, *Amer. Journ. of Pharm.*, **91**, 1919, p. 211 ; résumé dans *Journ. Pharm. et Chim.*, **15**, 1919, p. 91.  
 767. A. GUILLAUME, *Bull. Sc. Pharm.*, **35**, 1928, p. 347.

CUIVRE

768. D. A. VAN SCHREVEN, *Journ. des Fabric. de Sucre*, 1936, p. 323, d'après *Meded. Inst. Suikerbiet*, **6**, n° 2, 1936 et *Facts About Sugar*, **31**, n° 3, 1936.  
 769. B. F. LUTMAN, *Vermont Sta. Bul.*, **162**, 1911, p. 36.  
 770. C. D. WOODS, *Maine Sta. Bul.*, **277**, 1919, p. 17.  
 771. F. C. COOK, *U. S. Dept Agr. Bul.*, **1146**, 1923, p. 27.  
 772. E. O. MADER et F. M. BLODGETT, *Am. Potato J.*, **12**, 1935, p. 137.  
 773. J. E. KNOTT, *Amer. Soc. Hort. Sc. Proc.*, **28**, 1931, p. 318 et **31**, 1934, p. 561 ; *New-York Cornell Sta. Rpt.*, 1935, p. 139.  
 774. S. D. CONNER, *Indiana Agr. Extens. Service*, *Leaflet* **179**, 1933, p. 4.  
 775. T. F. MANNS et R. RUSSELL, *Trans. Peninsula Hort. Soc.*, 1934, p. 97.  
 776. W. L. CHURCHMANN, *Ibid.*, 1936, p. 92.  
 777. W. B. TISDALE, *Florida Agr. Expt. Sta. Rpt.*, 1930, p. 135.  
 778. K. SCHARRE et W. SCHROPP, *Bodenk. u. Pflanzenernähr.*, **1**, 1936, p. 168.  
 779. FR. BRÜNE, *Ibid.*, **20**, 1941, n° 3-4, p. 199.

ZINC

780. B. A. BOURNE, *Facts About Sugar*, **32**, 1937, p. 42.  
 781. W. H. CHANDLER, *Proc. Amer. Soc. Hort.*, 1931, p. 556.  
 782. A. F. CAMP et W. REUTHER, *Proc. Florida Sta. Hort. Soc.*, 1935, p. 59.

Essais avec plusieurs « Oligo-éléments »

783. M. E. PRONIN et W. P. GOLLE, *Zuckerindustrie*, 1936, n° 9 ; résumé dans *Publ. de l'Inst. Belge pour l'amélioration de la betterave*, Tirlemont, 1937, p. 125.  
 784. G. JORET et H. MALTERRE, *Recherches sur la fertilisation effectuées en 1939 par les Stat. Agron.*, p. 167.  
 785. G. GUYON et COLLIER, *Ibid.*, 1940, p. 97.  
 786. H. BURGEVIN, *Ibid.*, 1940, p. 95.

II. — Expériences personnelles

787. O. FÖRSTER, *Zeitschr. Anal. Chem.*, **28**, 1889, p. 422.  
 788. M. BERTHELOT, *C. R. Acad. Sc.*, **98**, 1884, p. 1506 ; *Chimie végétale et agricole* (Masson, Gauthier-Villars, édit.), Paris, 1899, **3**, p. 94 et suiv.  
 789. A. DEMOLON, *Principes d'agronomie*, t. II, *Croissance des végétaux cultivés*, 2<sup>e</sup> édit. (Dunod, édit.), Paris, 1941, p. 460 ; a) p. 164 ; b) p. 457.  
 790. E. KOHN-ABREST et S. KAWAKIBI, *C. R. Acad. Sc.*, **183**, 1926, p. 522.  
 791. M. JAVILLIER et M<sup>lle</sup> A. CRÉMIEU, *C. R. Acad. Agric.*, **14**, 1928, p. 986.

# TROISIÈME PARTIE

## « Oligo-éléments »

### et phénomènes microbiens intéressant l'Agriculture

#### GÉNÉRALITÉS

792. L. PASTEUR, *C. R. Acad. Sc.*, **56**, 1863, p. 734.
793. E. DUCLAUX, *Rev. Scientif.*, **52**, 1893, p. 834.
794. S. A. WAKSMAN, *C. R. de la Confér. des II<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> Commiss. Assoc. intern. Science du sol*, Helsinki, juillet 1938, d'après le résumé de G. BARBIER, *Ann. Agron.* nouv. série, **8**, 1938, p. 707.
795. S. A. WAKSMAN et J. HUTCHINGS, *Soil Science*, **42**, 1936, p. 119.
796. F. B. SMITH et P. E. BROWN, *Journ. of the Amer. Soc. of Agr.*, **27**, 1935, p. 109.
797. INGENHOUSZ, *Journ. de Phys., de Chim., d'Hist. nat. et des Arts*, 1794, II, p. 460.
798. A. F. DE HUMBOLDT, *Ann. de Chim.*, **29**, 1799, p. 134.
799. J. R. GLAUBER, d'après M. LENGLEN, *Chim. et Indust.*, **28**, 1932, n° 5, p. 1223 ; voir aussi *Recueil de mémoires et d'observations sur la formation et la fabrication du salpêtre* (Lacombe), Paris, 1776.
800. S. WINOGRADSKY, *Ann. Institut Pasteur*, **4**, 1890, p. 213, 257, 760 ; *Ibid.*, **5**, 1891, p. 32 et 577.
801. J. B. BOUSSINGAULT, *C. R. Acad. Sc.*, **76**, 1873, p. 22 ; *Ibid.*, **82**, 1876, p. 477.
802. Th. SCHLÖESING et A. MÜNTZ, *C. R. Acad. Sc.*, **84**, 1877, p. 301 ; **85**, 1877, p. 1018 ; **86**, 1878, p. 892 ; **89**, 1879, p. 891 et 1074 (a).
803. R. WARINGTON, *Journ. Chem. Society*, **33**, 1878, p. 44 ; **35**, 1879, p. 429.
804. S. WINOGRADSKY, *Arch. Sc. Biol. (Inst. imp. médec. expér. St-Petersbourg)*, **1**, 1892, p. 88 ; *Handb. der Technisch. Mykologie*, **3**, 1904, p. 132 ; en commun avec H. WINOGRADSKY, *Ann. Inst. Pasteur*, **50**, 1933, p. 350.
805. G. ANDRÉ, *Actes de la IV<sup>e</sup> Confér. internat. de Pédologie*, Rome (12-19 mai 1924), **1** (1926), p. 183.
806. M. LENGLEN (travail non signé), *Bull. Assoc. française pour l'étude du sol*, **3**, 1937, p. 252.
807. M. LEMOIGNE, *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **14**, 1932, p. 1113.
808. N. R. DHAR, A. K. BHATTACHARYA et N. N. BISWAS, *Soil Science*, **35**, 1933, p. 281.
809. N. R. DHAR et S. K. MUKERJI, *Ann. Agron.*, nouv. série, **11**, 1941, p. 87.
- 809 bis. G. G. RAO, *Soil Science*, **38**, 1934, p. 143.
810. Th. SCHLÖESING, *Contribution à l'étude de la Chimie agricole* (Dunod, édit.), Paris, 1888, p. 164 ; b) p. 202 ; c) p. 149.
811. J. B. BOUSSINGAULT, *Economie rurale considérée dans ses rapports avec la Chimie, la Physique et la Météorologie*, t. II (Béchet, édit.), Paris, 1844, p. 309.
812. VIRGILE, *Les Géorgiques*, I, 73-76, texte et traduction par R. BILLIARD (éd. d'Histoire et d'Art, libr. Plon, Paris, 1933, p. 8).
813. XENOPHON, *Economique*, XVI, 12 (édit. Holtze, 1829).
814. THÉOPHRASTE, *Historia plantarum*, VIII, 9, 1 (édit. Wimmer, 1854-1869).
815. PLINIE, *Naturalis Historiae*, XVII, 54 (édit. Jan, 1878).
816. CATON, *De Re Rustica*, XXXVII (d'après *Les Agronomes latins*, avec traduction en français, par NISARD, Paris, Dubochet et Cie, édit., 1844, p. 16).
817. VARRON, *Rerum Rusticarum, De Agricultura*, I, 23 (*ibid.*, p. 82).
818. COLUMELLE, *De Re Rustica*, II, 13 (*ibid.*, p. 214).
819. PALLADIUS, *De Re Rustica*, V, 1 (*ibid.*, p. 595).
820. PRIESTLEY, *Exper. and observ. on diff. kinds of airs*, t. III, p. 332 (cité par L. GRANDEAU, *Chim. et Physiol. appl. à l'Agric. et à la Sylvic.* (Berger-Levrault, édit.), Paris, 1879, p. 425).
821. INGENHOUSZ, *Expériences sur les végétaux*, t. II ; p. 146 (cité par L. GRANDEAU, *ibid.*).
822. J. B. BOUSSINGAULT, *C. R. Acad. Sc.*, **38**, 1854, p. 580 ; **39**, 1854, p. 601 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, **41**, 1854, p. 5 ; **43**, 1855, p. 149.
823. J. LIEBIG, *Lettres sur la Chimie*, 1845, p. 327 et suiv.
824. G. VILLE, *C. R. Acad. Sc.*, **31**, 1850, p. 578 ; **35**, 1852, p. 464 et 650 ; **38**, 1854, p. 705 et 723 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, **49**, 1857, p. 168, 185, 197.
825. J. B. LAWES, J. H. GILBERT et E. PUGH, *Philos. Trans.*, 1861, t. II, p. 431, résumé par A. RONNA dans *Rothamsted, un demi-siècle d'expériences agronomiques de MM. Lawes et Gilbert*, lib. agric. Maison rustique, Paris, 1900, p. 532.
826. P. DEHÉRAIN, *C. R. Acad. Sc.*, **73**, 1871, p. 1352.
827. Th. SCHLÖESING, *C. R. Acad. Sc.*, **80**, 1875, p. 175 ; **82**, 1876, p. 1202 ; **106**, 1888, p. 805, 898, 982, 1123 ; **107**, 1888, p. 290 ; **109**, 1889, p. 210 et 345.

828. M. BERTHELOT, *C. R. Acad. Sc.*, **82**, 1876, p. 1357; **83**, 1876, p. 677; **85**, 1877, p. 173; **87**, 1878, p. 92; **101**, 1885, p. 775; **104**, 1887, p. 205; **106**, 1888, p. 569, 1049, 1214; **107**, 1888, p. 372; **108**, 1889, p. 700; **109**, 1889, p. 277, 417; **111**, 1890, p. 753; **113**, 1891, p. 778; **115**, 1892, p. 569 et 637; **116**, 1893, p. 842 et 1388.
829. H. HELLRIEGEL et H. WILFARTH, *Untersuchungen über die Stickstoffnahrung der Gramineen und Leguminosen* (Zeitschr. Ver. Rub. Zucker-Indus., novembre 1888, Beilageheft, 234 p.), traduit de l'allemand par GOURIER dans *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 1890, p. 84.
830. E. BRÉAL, *C. R. Acad. Sc.*, **107**, 1888, p. 397; **109**, 1889, p. 670.
831. M. W. BELJERINCK, *Botan. Zeitung.*, **46**, 1888, p. 725, 741, 758, 782, 797.
832. A. TH. SCHLÖSING et E. LAURENT *C. R. Acad. Sc.*, **111**, 1890, p. 750; **113**, 1891, p. 776; **115**, 1892, p. 659 et 732; *Ann. Inst. Pasteur*, **6**, 1892, p. 65 et 824.
833. S. WINOGRADSKY, *C. R. Acad. Sc.*, **116**, 1893, p. 1385; **118**, 1894, p. 353; *Arch. des Sc. Biol.* (Inst. imp. med. exper. St-Petersbourg), **3**, 1895, p. 297.
834. M. WORONIN, *Mém. Acad. Imper. Sc.*, St-Petersbourg, **10**, 1866, n° 6; a) *Ibid.*, **10** (7), 1866, p. 1; *Ann. Sc. Natur. Bot.*, série 5, **7**, 1867, p. 73.
835. E. R. SPRATT, *Ann. of Botany*, **26**, 1912, p. 119; a) *Ibid.*, **29**, 1915, p. 619.
836. C. H. BORNEBUSCH, *Tidskr. f. Skovaes*, **26**, 1914, p. 28.
837. L. HILTNER, *Landw. Vers. Sta.*, **46**, 1896, p. 153.
838. W. B. BOTTOMLEY, *Ann. of Botany*, **29**, 1915, p. 605.
839. F. NOBBE et L. HILTNER, *Landw. Vers. Sta.*, **51**, 1899, p. 241.
840. L. MONTMARTINI, *Staz. Sperim. Agric. Ital.*, **38**, 1906, p. 1060.
841. M. C. RAYNER, *The Botanical Gazette*, **73**, 1922, p. 226.
842. A. ZIMMERMANN, *Jahrbuch Wissen Bot.*, **37**, 1902, p. 1.
843. H. MIEHE, *Ber. d. Deuts. Bot. Gesell.*, **29**, 1911, p. 156; **34**, 1916, p. 576; *Jahrbuch Wiss. Bot.*, **53**, 1913, p. 1; **58**, 1917, p. 29.
844. F. C. VON FABER, *Jahrb. Wiss. Bot.*, **51**, 1912, p. 285; **54**, 1914, p. 243.
845. GEORGEWITCH, *C. R. Soc. Biol.*, **79**, 1916, p. 411; *Bull. Bot. Gard. Kew.*, 1916, p. 105.
846. MALPIGHI, *Opera omnia. Anatomia plantarum Pars II, De gallis*, 1679.
847. ERIKSSON, *Acta Univ. Lund.*, **10**, 1873, p. 1; *Bot. Zeit.*, **32**, 1874, p. 381.
848. E. PRILLIEUX, *Bull. Soc. Bot. de France*, **26**, 1879, p. 98.
849. B. FRANK, *Botan. Zeit.*, **37**, 1879, p. 377 et 393.
850. MARSHALL WARD, *Philos. Transact. of the Roy. Soc. London (B)*, **178**, 1887, p. 539 et *Proceedings of the Roy. Society*, **46**, 1889, p. 431.
851. VUILLEMIN, *Ann. Sc. Agron. franç. et étrang.*, 1888, II, p. 121.
852. A. PRAZMOWSKI, *Bot. Centralbl.*, **36**, 1888, nos 7-8-9; **39**, 1889, p. 356; *Landwirtsch. Vers. Stat.*, **37**, 1890, p. 161 et **38**, p. 5.
853. P. VAN TIEGHEM et DOULLIOT, *Bull. Soc. Bot. de France*, **35**, 1888, p. 105.
854. E. LAURENT, *C. R. Acad. Sc.*, **111**, 1890, p. 754; (2) *Bull. Acad. Roy. de Belgique*, 3<sup>e</sup> série, **29**, 1890, p. 764; (3) *Ann. Inst. Pasteur*, **5**, 1891, p. 105.
855. P. A. DANGEARD, *Le Botaniste*, **16**, 1926, p. 1.
856. BRUNCHORST, *Bericht. d. deuts. botan. Gesellsch.*, **3**, 1885.
857. P. MAZÉ, *Ann. Inst. Pasteur*, **11**, 1897, p. 44.
858. S. WINOGRADSKY, *Centralbl. f. Bakt. II*, **9**, 1902, p. 43 et 107.
859. M. W. BELJERINCK, *Ibid.* II, **7**, 1901, p. 561.
860. J. G. LIPMAN, *New Jersey Agr. Exp. Sta. Ann. Rpt.*, **24**, 1903, p. 217; **25**, 1904, p. 237; **26**, 1905, p. 254; **29**, 1908, p. 137.
861. F. LÖHNIS et T. WESTERMANN, *Centralbl. f. Bakt. II*, **22**, 1908, p. 234.
862. W. L. OMELIANSKY, *Arch. des Sc. Biol.* (Inst. imp. med. exper. St-Petersbourg), **18**, 1915, p. 338; **20**, 1916, p. 24.
863. S. A. WAKSMAN, cité par S. WINOGRADSKY, *Soil Science*, **40**, 1935, n° 1 et *C. R. Acad. Agric.*, **21**, 1935, p. 1186.
864. S. WINOGRADSKY, *Ann. Inst. Pasteur*, **60**, 1938, p. 351.
865. G. TRUFFAUT et N. BEZSSONOFF, *C. R. Acad. Sc.*, **175**, 1922, p. 544.
866. N. R. DHAR, E. V. SESHACHARYULU et S. K. MUKERJI, *Ann. Agron.*, nouv. série, **11**, 1941, p. 83.
867. S. A. WAKSMAN, *Principles of Soil Microbiology*, seconde édition (Baillière, Tindall et Cox, London), 1931, p. 514.
868. S. WINOGRADSKY, *Ann. Inst. Pasteur*, **66**, 1941, p. 97.

## A. — « Oligo-éléments », combustion de la matière organique et nitrification

### I. — Travaux antérieurs

869. E. WOLLNY. — Les recherches nombreuses de ce savant publiées dans divers périodiques, notamment dans *Biedermanns Centralblatt*, *Journ. für Landwirtschaft, Landw. Versuchs Stat.* et surtout dans *Forsch. auf d. Geb. d. Agrik. Phys.*,

- recueil édité par ses soins, ont été exposées dans son ouvrage traduit en français par E. HENRY : *La décomposition des matières organiques et les formes d'humus dans leurs rapports avec l'agriculture*, Berger-Levrault, édit., Paris, 1902. Voir p. 200 ; a) p. 30.
870. H. VAN SUCHTELEN, *Centralbl. f. Bakt.* III, 28, 1910, p. 45.
871. J. STOKLASA, C. R. Assoc. Intern. Sc. du Sol dans *Rev. intern. de renseign. agric.*, 4, 1926, p. 621.
872. A. DEMOLON et P. BOISCHOT, C. R. Acad. Sc., 177, 1923, p. 282.
873. P. DOPFER, *Rapp. sur le fonct. de l'Inst. des Rech. Agron. en 1933*, p. 49 ; *Rech. sur la fertilit. effectuées en 1934 par les Stat. Agron.*, p. 50.
874. C. R. IYER, R. RAJAGOPALAN et V. SUBRAHMANYAN, *Proc. Indian Acad. Sc.*, 1 B, 1934, p. 106.
875. P. PICHARD, C. R. Acad. Sc., 98, 1884, p. 1289 ; *Ann. Agron.*, 10, 1884, p. 302.
876. R. WARINGTON, *Ann. Agron.*, 11, 1885, p. 557.
877. P. P. DEHÉRAIN, *Ibid.*, 14, 1888, p. 289.
878. F. DUMONT et F. CROCHETELLE, C. R. Acad. Sc., 117, 1893, p. 670.
879. A. B. BEAUMONT, *Proc. II<sup>e</sup> Congr. (Intern. Congr. Soil Science)*, 1932, 3, p. 57.
880. P. DOPFER, *Rech. sur la fertilit. effectuées en 1936 par les Stat. Agron.*, p. 33.
881. G. S. FRAPS et A. STERGES, *Soil Science*, 47, 1939, p. 115.
882. E. BOULLANGER et L. MASSOL, *Ann. Inst. Pasteur*, 18, 1904, p. 18.
883. J. E. GREAVES, *The Botanical Gazette*, 73, 1922, p. 161.
884. J. E. GREAVES, E. G. CARTER et H. C. GOLDTHORPE, *Journ. of Agric. Research*, 16, 1919, p. 107.
885. J. G. LIPMAN, P. E. BROWN et I. S. OWEN, *New Jersey Agr. Expt. Sta. Rpt.*, 1910, p. 89.
886. J. VOICU, *Thèse Faculté des Sciences*, Paris, 1923 (édit. de la « Vie Universitaire »), p. 73 ; a) p. 95 et suiv.
887. E. V. BOBKO et M. A. BELVOUSSOW, *Ann. Agron.*, nouv. série, 6, 1936, p. 696.
888. J. E. GREAVES, *Biochem. Bull.*, 3, 1913, p. 2.
889. R. GUILLIN, C. R. Acad. Agric., 2, 1916, p. 760.
890. G. LÉONCINI, *Staz. Sper. Agr. Ital.*, 47, 1914, p. 777.
891. P. E. BROWN et G. A. MINGES, *Soil Science*, 2, 1916, p. 67 ; *Iowa Sta. Research Bull.*, 35, 1916, p. 3.
892. Z. PIETRUSZCZINSKI, *Rocz. Nauk Rolnicz.*, 9, 1923, p. 235.
893. D. NELSON, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, 21, 1929, p. 547.
894. G. PATUREL, *Le Progrès agricole et viticole*, 34, 1913, p. 711.
895. C. A. JENSEN, *Journ. Amer. Soc. Agron.*, 8, 1916, p. 10.
896. W. E. BOWSER et J. D. NEWTON, *Canad. Journ. of Research*, 8, 1933, p. 73.
897. C. B. LIPMAN et P. S. BURGESS, *University of California. Publ. in Agric. Sc.*, 1, 1914, p. 127.
898. C. MONTANARI, *Staz. Sperim. Agr. Ital.*, 50, 1917, p. 69.

## II. — Expériences personnelles

899. J. B. BOUSSINGAULT et E. LÉWY, C. R. Acad. Sc., 35, 1852, p. 765 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, 37, 1853, p. 5.
900. CORENWINDER, C. R. Acad. Sc., 41, 1855, p. 149 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, 48, 1856, p. 179.
901. A. Th. SCHLESING, C. R. Acad. Agric., 10, 1924, p. 513.
902. A. DEMOLON et G. BARBIER, C. R. Acad. Sc., 192, 1931, p. 514 ; *Ann. Agron.*, nouv. série, 1, 1931, p. 531.
903. P. P. DEHÉRAIN, *Ann. Agron.*, 19, 1893, p. 401.

## B. — « Oligo-éléments » et fixation de l'azote atmosphérique

### I. — Travaux antérieurs

904. E. MARCHAL, C. R. Acad. Sc., 133, 1901, p. 1032.
905. H. G. THORNTON et H. NICOL, *Journ. of Agric. Sc.*, 24, 1934, p. 269.
906. A. DEMOLON et A. DUNEZ, *Ann. Agron.*, nouv. série, 6, 1936, p. 434 et 10, 1940, p. 366.
907. W. A. ALBRECHT, *Soil Science*, 9, 1920, p. 275.
908. H. BURGEVIN, C. R. Acad. Sc., 196, 1933, p. 441 ; C. R. Acad. Agric., 19, 1933, p. 186.
909. S. WINOGRADSKY, *Ann. Inst. Pasteur*, 40, 1926, p. 455 ; a) et M<sup>me</sup> J. ZIEMIECKA, *Ibid.*, 42, 1928, p. 36.
910. J. STOKLASA, *Centralbl. f. Bakt.* II, 29, 1911, p. 385.

911. H. R. CHRISTENSEN, *Ibid.* II, **43**, 1915, p. 1.
912. A. CAUDA, *Stazion. Sperimentali Agrar. Ital.*, **49**, 1916, p. 125.
913. H. NIKLAS, K. SCHARRER et A. STROBEL, *Landw. Jahrb.*, **63**, 1926, p. 387.
914. J. E. GREAVES, *Soil Science*, **13**, 1922, p. 481.
915. J. E. GREAVES, *Journ. of Agric. Research*, **6**, 1916, p. 389.
916. E. B. FRED, *Centralbl. f. Bakt.* II, **31**, 1911, p. 185.
917. H. KASERER, *Ber. d. Deuts. Bot. Gesellsch.*, **28**, 1910, p. 208.
918. S. HERKE, *Kiserlet. Kozlem.*, **16**, 1913, p. 311.
919. D. OLARU, *C. R. Acad. Sc.*, **160**, 1915, p. 280.
920. A. G. ROCASOLANO, *Rev. R. Acad. Ciencias*, Madrid, **14**, 1916, p. 681.
921. C. R. FELLERS, *Soil Science*, **6**, 1919, p. 81.
922. J. E. GREAVES, *Ibid.*, **36**, 1933, p. 267.
923. C. R. BAIER, *Centr. Bakt. Parasitenk.* II, **95**, 1936, p. 97.
924. T. F. MANNS, W. L. CHURCHMAN et M. M. MANNS, *Del. Agr. Expt. Sta. Bull.*, **205**, 1936, p. 45.

## II. — Expériences personnelles

925. JOLDBAUER, *Chem. Centralbl.* (3), **17**, 1886, p. 433 ; *Zeitsch. Anal. Chem.*, **26**, 1887, p. 92.
926. J. KÖNIG, *Chemie der menschlichen Nahrungs und Genussmittel*, Berlin, 1910, p. 451.
927. G. KLEIN, *Handbuch der Pflanzenanalyse* (Jul. Springer, édit.), Wien, 1933, Spez. anal. 3, org. stof. III, p. 1389.
928. W. MESTREZAT et Marthe PAUL-JANET, *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **3**, 1921, p. 105.
929. H. LEVALTIER, *Recherches sur le dosage de l'azote par la méthode de Kjeldahl* (L. Arnette, édit.), Paris, 1924, p. 28.
930. S. et H. WINOGRADSKY, *Ann. Inst. Pasteur*, **56**, 1936, p. 221.
931. A. I. VIRTANEN et S. V. HAUSEN, *Nature*, **135**, 1935, p. 184 ; *Journ. of Agric. Sc.*, **25**, 1935, p. 278 ; A. I. VIRTANEN, *Ann. de l'Ecole supér. d'Agriculture de Suède*, **5**, 1938, p. 429.
932. G. BOND, *Nature*, 1938, n° **142**, p. 539.
933. R. E. SHAPTER, *J. Council Sc. Ind. Research*, **12**, 1939, p. 23.
934. P. W. WILSON et J. C. BURTON, *Journ. of Agr. Sc.*, **28**, 1938, p. 307.
935. R. CHAMINADE, *Ann. Agron.*, nouv. série, **3**, 1933, p. 799.
936. J. E. GREAVES et A. F. BRACKEN, *Soil Science*, **47**, 1939, p. 201.
937. L. NEIPP, *De l'influence de divers cations sur le croît microbien* (Masson, édit., Paris), 1937, p. 235 et suiv.
938. G. BERTRAND et R. SAZERAC, *C. R. Acad. Sc.*, **157**, 1913, p. 149.
939. A. ZLATAROFF et D. KALTSCHewa, *Biochem. Zeitschr.*, **284**, 1936, p. 12.
940. T. MADSEN et M. NYMAN, *Zeitschr. f. Hyg. u. Inf. Krank.*, **57**, 1907, p. 388.

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

941. G. BERTRAND, *Ann. Agron.*, nouv. série, **8**, 1938, p. 309.



# TABLE DES MATIÈRES

|                       | Pages |
|-----------------------|-------|
| INTRODUCTION. . . . . | 1     |

## PREMIÈRE PARTIE

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET DÉVELOPPEMENT DES PLANTES. . . . . | 15 |
| I. — <i>Travaux antérieurs</i> . . . . .                 | 17 |
| Bore. . . . .                                            | 17 |
| Fluor . . . . .                                          | 28 |
| Arsenic. . . . .                                         | 32 |
| Iode. . . . .                                            | 35 |
| Chrome . . . . .                                         | 39 |
| Manganèse. . . . .                                       | 40 |
| Cuivre . . . . .                                         | 48 |
| Zinc . . . . .                                           | 56 |
| Plomb . . . . .                                          | 61 |
| II. — <i>Expériences personnelles</i> . . . . .          | 64 |
| Méthode expérimentale adoptée. . . . .                   | 64 |
| Conditions choisies et détails techniques . . . . .      | 67 |
| Résultats obtenus. . . . .                               | 87 |
| Conclusions . . . . .                                    | 89 |

## DEUXIÈME PARTIE

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET QUALITÉ DES RÉCOLTES. . . . . | 93  |
| I. — <i>Travaux antérieurs</i> . . . . .            | 96  |
| II. — <i>Expériences personnelles</i> . . . . .     | 100 |

## TROISIÈME PARTIE

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET PHÉNOMÈNES MICROBIENS INTÉRESSANT L'AGRI-<br>CULTURE . . . . .       | 103 |
| A. — « OLIGO-ÉLÉMENTS », COMBUSTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET NITRI-<br>FICATION. . . . . | 113 |
| I. — <i>Travaux antérieurs</i> . . . . .                                                   | 113 |
| II. — <i>Expériences personnelles</i> . . . . .                                            | 116 |
| Méthode adoptée. . . . .                                                                   | 116 |
| Détails techniques . . . . .                                                               | 118 |
| Résultats obtenus. . . . .                                                                 | 122 |
| Conclusions . . . . .                                                                      | 123 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| B. — « OLIGO-ÉLÉMENTS » ET FIXATION DE L'AZOTE ATMOSPHÉRIQUE . . . .                | 126 |
| I. — <i>Travaux antérieurs</i> . . . . .                                            | 126 |
| II. — <i>Expériences personnelles</i> . . . . .                                     | 128 |
| Méthode adoptée. . . . .                                                            | 128 |
| Détails techniques . . . . .                                                        | 129 |
| Résultats obtenus. . . . .                                                          | 131 |
| Conclusions . . . . .                                                               | 135 |
| Examens complémentaires . . . . .                                                   | 137 |
| <i>Conclusions relatives à l'ensemble des phénomènes microbiens étudiés</i> . . . . | 142 |
| <br>RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES . . . . .                                       | 145 |
| BIBLIOGRAPHIE. . . . .                                                              | 149 |

## DEUXIÈME THÈSE

---

### Propositions données par la Faculté

L'EAU DANS LE SOL  
ET LES RELATIONS DE LA PLANTE AVEC CETTE EAU

Vu et approuvé :

*Paris, le 28 Juillet 1942.*

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

P. MONTEL.

Vu  
et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie  
de Paris,

Gilbert GIDEL.





